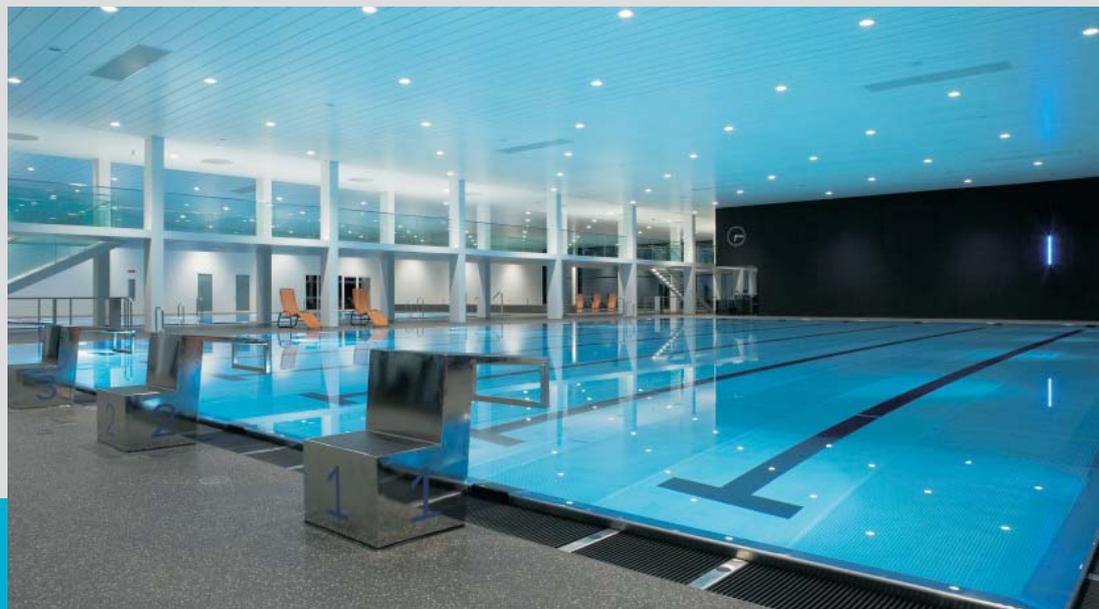


# Softwareentwicklung und Anwendungsbeispiele für Berndorf-Edelstahl- schwimmbecken

D-5-28-2010



**Unterweger Manfred**  
Institut für Stahlbau und Flächentragwerke  
Technische Universität Graz



# Softwareentwicklung und Anwendungsbeispiele für Berndorf-Edelstahlschwimmbecken

Masterarbeit von  
Manfred Unterweger

Eingereicht am  
Institut für Stahlbau und Flächentragwerke



Fakultät für Bauingenieurwissenschaften  
Technische Universität Graz

Begutachter  
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Greiner

Betreuer  
Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Lechner

Zweitbetreuer  
Dipl.-Ing. (FH) Friedrich Hutter  
Firma Berndorf Bäderbau GmbH

Graz, 26. September 2010



Deutsche Fassung: Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008 Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Graz, 26. September 2010

---

Manfred Unterweger

Englische Fassung:

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 26. September 2010

---

Manfred Unterweger

## Danksagung

Ich danke ganz besonders meinem Vater Alois sowie meinen Geschwistern Markus und Harald für die Unterstützung und das Vertrauen während der gesamten Studienzeit.

Besonderer Dank gilt Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Richard Greiner dafür, dass ich die vorliegende Masterarbeit am Institut für Stahlbau und Flächentragwerke durchführen konnte.

Speziell bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Lechner für seine hilfreiche Unterstützung und sehr guten Ratschläge. Weiters danke ich den Mitarbeitern des Institutes für Stahlbau und Flächentragwerke für die gute Zusammenarbeit.

Ich möchte mich vor allem auch bei meinen Freunden und Studienkollegen bedanken, ganz besonders bei Herrn Mathias Rasser und Herrn Florian Scheikl.

Diese Arbeit ist meinem Vater Alois gewidmet.

# Tragfähigkeitsberechnung von Edelstahlschwimmbecken

## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Bemessungssoftware auf Basis von Microsoft Excel zur Bemessung von Edelstahlschwimmbecken gemäß ON EN 1993. Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der österreichischen Firma Berndorf Metall- und Bänderbau GmbH erstellt. Das Bemessungsprogramm ist in der Lage alle Nachweise nach gültigen Normen zu erbringen und automatisch eine Ausgabedatei anzufertigen. In den folgenden Ausführungen wird die Entwicklung dieses Bemessungstools zur Tragfähigkeitsberechnung von Edelstahlschwimmbecken beschrieben. Weiters wurde im Vorfeld eine elektronische statische Berechnung für 3D-Beckentragstrukturen durchgeführt. Neben der Schleifenentwicklung für den iterativen Lösungsprozess der mitwirkenden Plattenbreite wurde im Zuge dieser Masterarbeit auch auf die Detailbemessung, Anwendungsbeispiele sowie Musterlösungen und Vergleichsrechnungen eingegangen. Zusätzlich zu den theoretischen Hintergründen zur Erstellung des Programms wird ganz besonders auf die Umsetzung mittels Microsoft Excel und Visual Basic eingegangen.

# Load-carrying capacity of swimming pools made of stainless steel

## Abstract

This master thesis deals with the development of a design software based on Microsoft Excel for structural design of swimming pools made of stainless steel according to ON EN 1993. This thesis was created in cooperation with the Austrian company Berndorf Metall- und Bäderbau GmbH. The design software is able to produce all verifications according to current design standards and to automatically deliver an output file. The following statements describe the development of the calculation software for load-carrying capacity. Furthermore, an electronically static analysis of the 3D support structure was performed in the preparation process. Besides creating loops for the iterative calculation process for the implementation of effective width, this thesis also includes dimensioning of constructional details, examples of use, sample solutions and comparisons. In addition to the theoretical background needed to develop the calculation software, the implementation of Microsoft Excel and Visual Basic is shown.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines . . . . .	1
1.2	Angaben und Arbeitsziel . . . . .	1
1.2.1	Material . . . . .	2
1.2.2	Einwirkungen . . . . .	2
1.2.3	Geometrie . . . . .	3
1.3	Lösungsansatz . . . . .	3
1.4	Bezeichnung der Bauteile . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Strukturberechnung</b>	<b>6</b>
2.1	Berechnung der Plattentragwirkung mittels FE-Methode . . . . .	6
2.1.1	Allgemein . . . . .	6
2.1.2	Materialkennwerte . . . . .	6
2.1.3	Bezeichnung der Stauhautelemente . . . . .	7
2.1.4	Abmessungen der Stauhaut . . . . .	7
2.1.5	Auflagerbedingungen . . . . .	7
2.1.6	Lastfälle . . . . .	8
2.1.7	Berechnungsparameter . . . . .	9
2.1.8	Ergebnisse . . . . .	10
2.1.9	Vergleich mit analytischen Lösungen . . . . .	18
2.2	Implementierung der Plattentragwirkung ins Bemessungstool . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse der Plattenberechnung</b>	<b>21</b>
3.1	Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte . . . . .	21
3.2	Vergleich der Ergebnisse von aneinandergereihten Einzelplatten . . . . .	25
3.2.1	Stauhaut ohne horizontale Rippen . . . . .	25
3.2.2	Stauhaut mit horizontalen Rippen . . . . .	28
3.3	Erkenntnisse aus den Vergleichsrechnungen . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Überlaufrinne</b>	<b>34</b>
4.1	Geometrie und Auflagerbedingungen . . . . .	35
4.2	Material . . . . .	36
4.3	Belastung . . . . .	36
4.4	Ergebnisse . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Bemessungsprogramm</b>	<b>57</b>
5.1	Allgemein . . . . .	57
5.2	Installation . . . . .	57
5.3	Aufbau . . . . .	57
5.4	Arbeitsmappe Bemessungstool . . . . .	58
5.4.1	Tabellenblätter . . . . .	59
5.4.2	Userformen . . . . .	61
5.4.3	Module . . . . .	66
5.5	Weitere Arbeitsmappen . . . . .	67
5.6	Berechnungsablauf . . . . .	67
5.6.1	Systemberechnung . . . . .	68
5.6.2	Plattenberechnung . . . . .	69
5.6.3	Detailbemessung . . . . .	74
5.6.4	Rippenbemessung . . . . .	80
5.6.5	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	81

---

5.6.6	Schutzmechanismus . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Bemessung</b>	<b>84</b>
6.1	Bemessungsgrundlagen . . . . .	84
6.2	Normalspannung . . . . .	89
6.3	Biegespannung . . . . .	90
6.4	Schubspannung . . . . .	90
6.5	Vergleichsspannung . . . . .	91
6.6	Beulen . . . . .	91
6.7	Verformung . . . . .	91
6.8	Stauhaut . . . . .	91
6.8.1	E-P Nachweis der Tragsicherheit . . . . .	91
6.8.2	E-E Nachweis der Gebrauchstauglichkeit . . . . .	92
6.9	Detailbemessung . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>93</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>94</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>96</b>
<b>A</b>	<b>Programmcode</b>	<b>98</b>
<b>B</b>	<b>Musterlösungen</b>	<b>98</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Das Unternehmen “Berndorf Metall– und Bäderbau GmbH” ist eine Tochtergesellschaft der Berndorf AG und gehört zur Technologie–Gruppe des Konzerns. Die Berndorf AG und jede ihrer Tochtergesellschaften sind selbstständige Unternehmen der Investitionsgüterindustrie, welche national und international tätig sind. Berndorf Bäderbau hat seinen Sitz im niederösterreichischen Berndorf, wo die Unternehmensführung und die Produktionsstätte beheimatet sind. Das Unternehmen ist seit 1960 eine der führenden Produzenten von Schwimmbadanlagen. In den Anfangsjahren des Unternehmens wurden alle hergestellten Schwimmbecken aus Aluminium gefertigt. Anfang der 70er Jahre führte die Produktentwicklung des Unternehmens zur Einführung des Werkstoffes Edelstahl. Bis zum heutigen Tage errichtete Berndorf Bäderbau mehr als 5000 Schwimmbäder in den unterschiedlichsten Größen und Formen in ganz Europa. Diese Schwimmbäder zeichnen sich durch ihre hervorragenden technischen und optischen Eigenschaften aus und werden nicht nur mehr ausschließlich im kommunalen Bäderbau eingesetzt, sondern Privatkunden und Hotelbetreiber schenken den Edelstahlschwimmbädern von Berndorf in der jüngeren Vergangenheit vermehrt ihre Aufmerksamkeit. Das Unternehmen ist stets bemüht mit ausgereiften technischen Lösungen, modernen Fertigungsmethoden und hoch motivierten Mitarbeitern seine Position als Marktführer zu behaupten (Berndorf Bäderbau, 2010).

## 1.2 Angaben und Arbeitsziel

Die österreichische Firma Berndorf Bäderbau ist eine der führenden Hersteller von Edelstahlschwimmbädern im europäischen Raum. Um ihre Marktführerposition zu behaupten, ist das Unternehmen stets bemüht neue Entwicklungen auf dem Gebiet des Edelstahlschwimmbekens voranzutreiben. Aus diesem Grund beauftragte Berndorf Bäderbau die TU Graz im Jahre 2009 mit der Konzeption einer neuen Generation von Edelstahlschwimmbekens. Dieses Konzept beinhaltet eine neue Rippengeometrie, Anordnung der aussteifenden Horizontalrippen sowie eine vollständig neue Beckenkopfausbildung. Eine Optimierung hinsichtlich des Materialverbrauchs und somit der Kosten stand im Vordergrund. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Bemessungstools auf Basis von Microsoft Excel zur Bemessung dieser Edelstahlschwimmbekens. Das Bemessungstool soll in der Lage sein die Bemessung der benötigten Bauteile mittels benutzerfreundlichen Eingabeaufforderungen durchzuführen und die Ergebnisse klar und deutlich darzustellen. Weiters sollten alle Programmierschritte, vor allem aber der Visual Basic<sup>1</sup> Code, leicht nachvollziehbar und klar strukturiert sein, um zu einem späteren Zeitpunkt eventuelle Modifizierungen der Berechnungen möglichst einfach zu gestalten.

Folgende Angaben wurden von der Firma Berndorf bezüglich Material, Belastungen und Geometrie gemacht.

---

<sup>1</sup>kurz VBA

### 1.2.1 Material

“Edelstahl Rostfrei ist ein Sammelbegriff für die nichtrostenden Stähle. Sie enthalten mindestens 10,5 % Chrom (Cr) und weisen gegenüber unlegierten Stählen eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf. Höhere Cr-Gehalte und weitere Legierungsbestandteile wie z.B. Nickel (Ni) und Molybdän (Mo) erhöhen die Korrosionsbeständigkeit weiter” (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 2006).

Edelstahl hat eine lange Tradition im Bauwesen und zeichnet sich durch seine lange Lebensdauer und durch seine minimalen Unterhaltskosten aus. Heutzutage werden mehr als 80 % der erstellten Edelstahlschwimmbäder aus Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl gefertigt. Entscheidend für die Wahl des Edelstahls ist in erster Linie der Chloridgehalt des Beckenfüllwassers, welcher einen wesentlichen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes hat. In den meisten Fällen werden Schwimmbecken mit Wasser in Trinkwasserqualität mit niedrigem Chloridgehalt befüllt. Der Edelstahlwerkstoff mit der Bezeichnung 1.4404 ist für diese Randbedingungen der optimale Werkstoff. Da Thermalwässer und Heilwässer meist einen höheren Chloridgehalt aufweisen, werden hier meist höherwertige Werkstoffe eingesetzt, wie z.B. der Edelstahlwerkstoff mit der Bezeichnung 1.4462 (Berndorf Bäderbau, 2010). Tabelle 1.2.1 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der drei verwendeten Edelstahlwerkstoffe. Alle Materialkennwerte gelten für Blechdicken kleiner gleich 6 mm nach ON EN 1993-1-4: 1996.

Bezeichnung		1.4404	1.4462	1.4547
Gefüge		austenitisch <sup>2</sup>	austenitisch-ferritisch <sup>3</sup>	austenitisch
Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>y</sub>	240	480	320
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	f <sub>u</sub>	530	660	650
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	E	200.000	200.000	195.000

Tabelle 1: Materialkennwerte für den Werkstoff Edelstahl nach ON EN 1993-1-4: 1996

<sup>2</sup>Hauptlegierungsbestandteil Chrom

<sup>3</sup>Hauptlegierungsbestandteile Chrom, Nickel und Molybdän

Weiters wird nach ON EN 1993-1-4: 1996 angegeben:

- Schubmodul  $G = \frac{E}{1 \cdot (2 + \nu)}$
- Querdehnungszahl  $\nu = 0,3$

### 1.2.2 Einwirkungen

Die einwirkenden Lasten wurden der unter anderem der Behälterfüllungsnorm ON EN 1991-4: 1996 bzw. der ON B 1991-4: 1996 entnommen.

Die Belastungen, die auf das Gesamtsystem wirken, lassen sich wie folgt einteilen:

- Ständige Lasten
- Veränderliche Lasten

Zu den ständigen Lasten zählen unter anderem das Eigengewicht der Stauhaut, der Rippen sowie der Abstreben und der Rinne. Auch der Erddruck, falls vorhanden, welcher sich in den aktiven Erddruck und in den Erdruhedruck unterteilen lässt, wird zu den ständigen Lasten gezählt. Zu den veränderlichen Lasten müssen demnach der hydrostatische Druck und die Verkehrslasten am Beckenrand und auf der Trittstufe gezählt werden. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Lasten wird

im Rahmen des Bemessungsprogrammes auch der Lastfall Temperatur behandelt. Sämtliche Lastfälle sind zu kombinieren, um die für die Bemessung ungünstigste Lastfallkombination zu erhalten, mit welchem die Bauteile im Anschluss auf ihre Tragsicherheit und ihre Gebrauchstauglichkeit bemessen werden.

### 1.2.3 Geometrie

Vor allem die maximale Beckentiefe des zu bemessenden Edelstahlschwimmbeckens mit Trittstufe wurde mit einer Tiefe von 2,20 m angegeben. Weiters sollte sich bei einer Ausführung des Beckens mit Trittstufe, diese in einer Tiefe von 1,20 m befinden. Die Blechstärken der Rippen und der Stauhaut sollen auf ein Minimum reduziert werden können, und die neu entwickelten Rippen sollten weiter voneinander entfernt werden, um weniger Material zu verbrauchen. Die folgende Abbildung zeigt die bisherige Beckenausführung ohne Trittstufe in einer Ansicht. Auch die bisher verwendete Überlaufrinne ist dort ersichtlich.

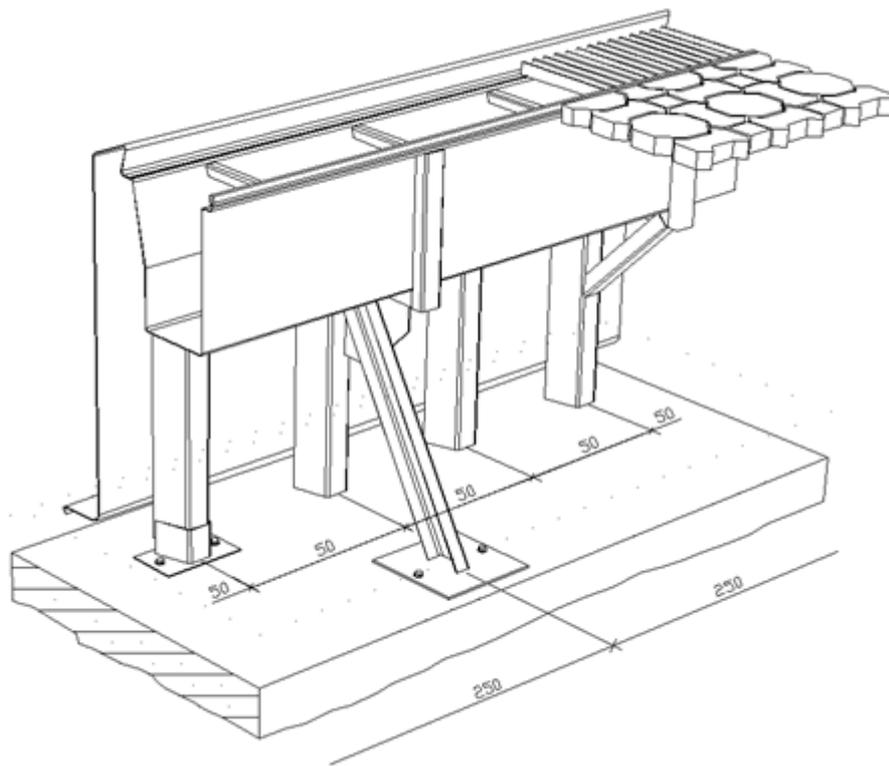


Abbildung 1: Bisherige Beckengeometrie ohne Trittstufe

## 1.3 Lösungsansatz

Die Bemessung der Stauhaut und der neu entwickelten Rippen soll mit Hilfe von Microsoft Excel durchgeführt werden. Hierbei galt es möglichst viele Schritte der Bemessung mit den integrierten Excel-Funktionen zu bewerkstelligen und nur in wenigen Fällen auf Visual Basic Unterstützung zurückzugreifen, um das Programm möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten. Weiters wurde versucht, den verwendeten VBA Code in einer möglichst übersichtlichen Art und Weise zu erstellen

und die einzelnen Berechnungsschritte mit Textkommentaren genau zu beschriften, damit mögliche Modifizierungen seitens der Firma Berndorf möglich sind. Da die Berechnung des Gesamtsystems sehr umfangreich ist und die Bemessung der Stauhaut, der Rippen und der Detailpunkte den Rahmen einer Arbeitsmappe gesprengt hätten, wurden den einzelnen Bemessungsabschnitten jeweils eine eigene Arbeitsmappe zugeteilt. Alle Angaben und Ziele der Firma Berndorf (siehe Abschnitt 1.2) sind zu berücksichtigen und in das Programm zu implementieren. Nach der Bemessung der einzelnen Bauteile soll eine Ergebnisdatei alle für die Berechnung eingegeben Werte, sämtliche Nachweise und Annahmen klar und übersichtlich darstellen. Abbildung 2 zeigt die neu entwickelte Beckenstruktur in einer Ansicht.

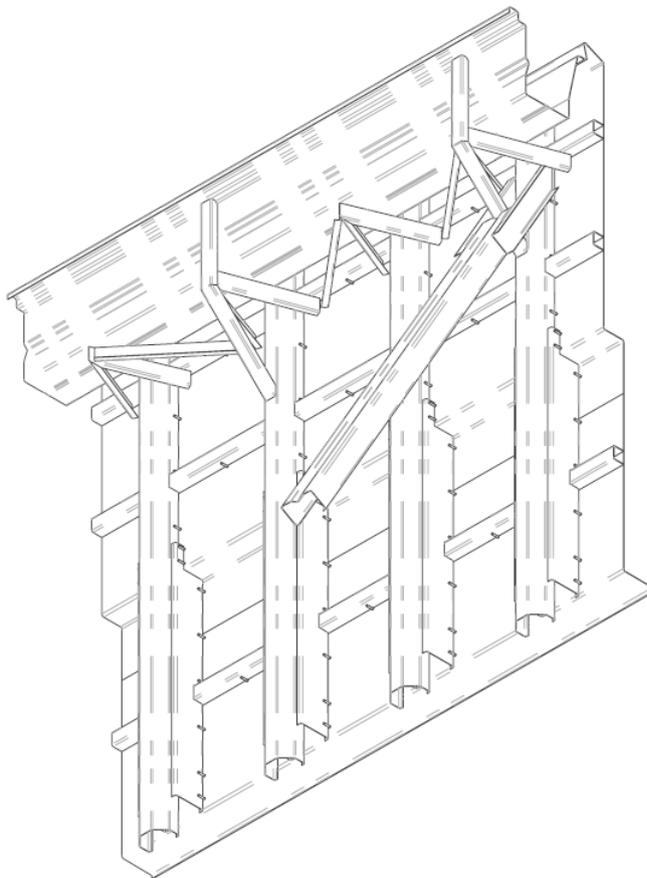


Abbildung 2: Neu entwickelte Beckengeometrie mit Trittstufe

## 1.4 Bezeichnung der Bauteile

Die nachfolgende Abbildung stellt die einzelnen Bauteile der neuen Beckenstruktur dar. Die Stauhaut selbst ist in der Darstellung in weiß gehalten.

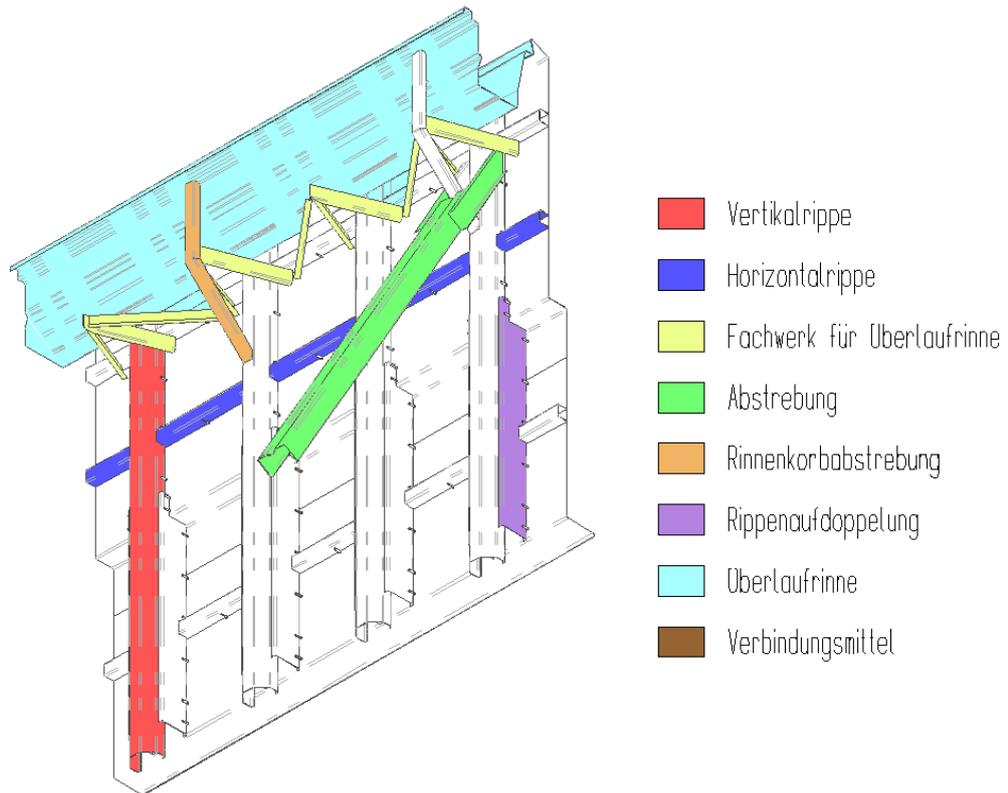


Abbildung 3: Bauteile der Beckenstruktur

## 2 Strukturberechnung

In diesem Abschnitt werden die zur Programmierung benötigten Grundlagen zur Bemessung der Stauhaut sowie sämtliche Arbeitsschritte der Vorstudie, welche das Tragverhalten von Platten bei gegebenen Auflagerbedingungen beinhaltet, erläutert. Um das Tragverhalten der Stauhaut möglichst realitätsnah zu erfassen, genügte eine einfache Durchlaufträgerrechnung, wie sie am Anfang der Vorstudie versucht wurde, nicht mehr um das komplexe Tragverhalten zu beschreiben. Aus diesem Grund bediente man sich der Finite-Elemente-Methode<sup>4</sup>, welche imstande ist die dreidimensionale Plattentragwirkung für verschiedene Belastungsbilder und Randbedingungen zu beschreiben. Es sei hier noch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass lediglich die Plattentragwirkung der Stauhaut untersucht wurde und auf die Scheibentragwirkung gänzlich verzichtet wurde.

### 2.1 Berechnung der Plattentragwirkung mittels FE-Methode

#### 2.1.1 Allgemein

Die FE-Methode, auch Methode der Finiten Elemente genannt, ist ein computerorientiertes numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung partieller Differentialgleichungen mit Randbedingungen. In der Statik wird sie zur Berechnung von Spannungen und Verformungen von Platten, Scheiben und Schalen verwendet. Die Finite-Elemente-Methode bedient sich dem verallgemeinerten Weggrößenverfahren<sup>5</sup>. Dabei wird das Tragwerk in rechteck- oder dreiecksförmige Finite Elemente unterteilt, welche an den Knotenpunkten miteinander verbunden sind. Für alle Elemente werden Elementsteifigkeitsmatrizen aufgestellt und mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen der Kräfte an den Knoten wird eine Gesamtsteifigkeitsmatrix gebildet. Äußere Einwirkungen werden auf die Knotenpunkte aufgeteilt und bilden den Lastvektor des Gleichungssystems. Die Lösung des somit entstandenen Gleichungssystems ergibt die Verschiebungsgrößen des Tragwerks, aus welchen dann die Schnittgrößen in den einzelnen Elementen ermittelt werden. Da sich für Flächentragwerke nur näherungsweise Ergebnisse berechnen lassen, muss die Anzahl der Elemente möglichst hoch gehalten werden um befriedigende Ergebnisse zu erhalten (Schneider, 2008). Die Berechnungen der Stauhautelemente wurden mit einer Studentenversion des FE-Programms *SCIA Engineer*<sup>6</sup> der Firma *Nemetschek* nach dem Verfahren E-E (lineare elastische Schnittkraft- und Spannungsrechnung) durchgeführt. Es wurde eine umfangreiche Parameterstudie mit jeweils zwei Lastfällen, zwei Variationen der Randbedingungen sowie 100 verschiedenen Geometrieverhältnissen (insgesamt 400 Fälle) durchgeführt.

#### 2.1.2 Materialkennwerte

Vor der Berechnung wurden die Materialkennwerte der Stauhaut im Programm *SCIA* definiert. Die Stauhaut wurde als Schale definiert und folgende Eingaben hinsichtlich der Materialkennwerte wurden für diese getätigt:

- Fließgrenze: 240 N/mm<sup>2</sup>
- Zugfestigkeit: 530 N/mm<sup>2</sup>
- E-Modul: 200.000 N/mm<sup>2</sup>
- G-Modul: 76.923 N/mm<sup>2</sup>
- Querdehnungszahl:  $\nu = 0,3$

---

<sup>4</sup>kurz FE-Methode

<sup>5</sup>auch Verschiebungsgrößenverfahren genannt

<sup>6</sup>kurz *SCIA*

Das eingegebene Material entspricht somit dem Werkstoff mit der Abkürzung 1.4404 (vgl. Abschnitt 1.2.1).

### 2.1.3 Bezeichnung der Stauhautelemente

Abbildung 4 zeigt die Stauhautelemente mit ihren Bezeichnungen. Der Rippenabstand  $e_{\text{rippe}}$  bezieht den Abstand des Schwerpunktes zweier Rippen und nicht die lichte Breite zwischen den Rippen.

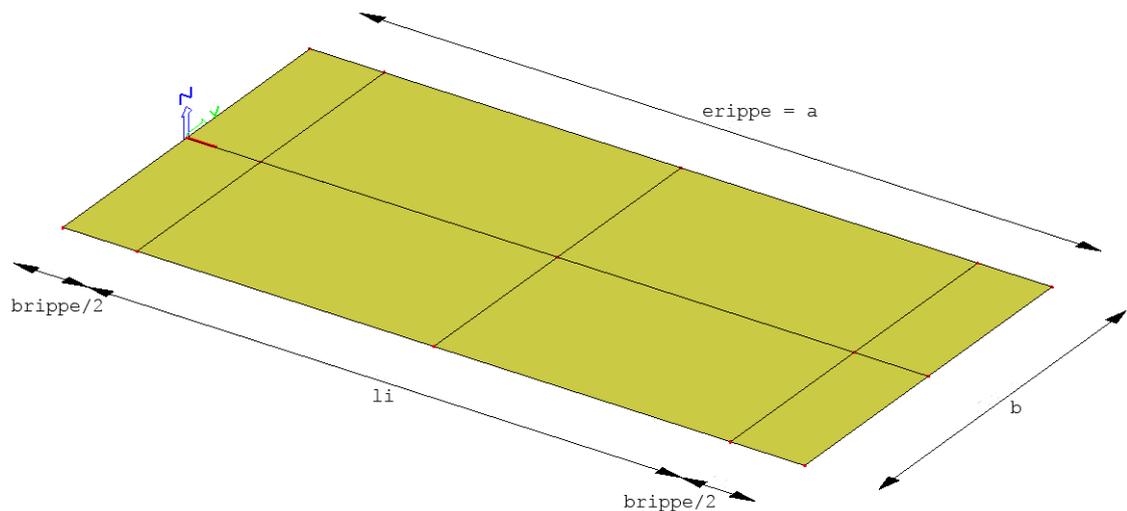


Abbildung 4: Bezeichnung der Stauhautelemente

### 2.1.4 Abmessungen der Stauhaut

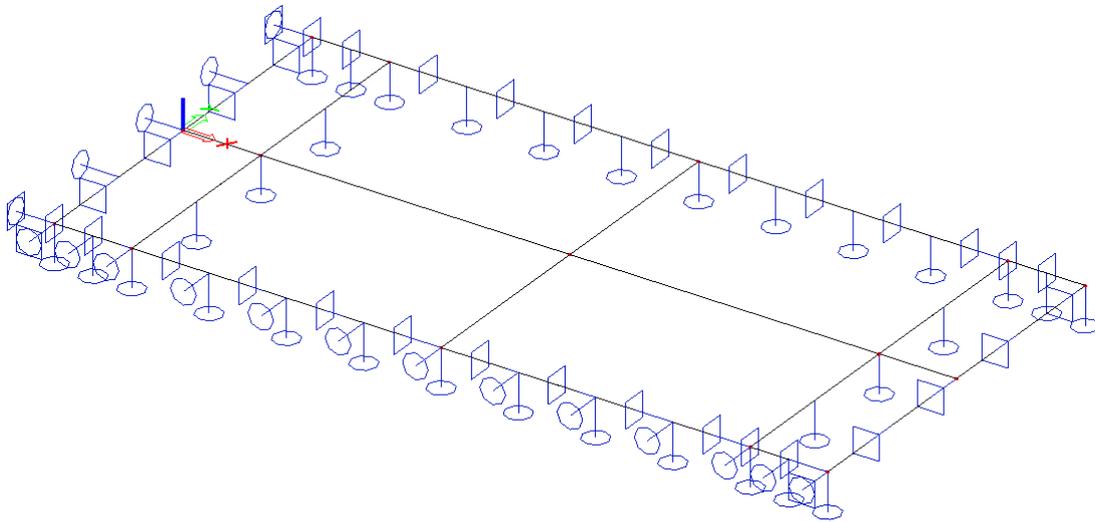
Die Abmessungen der Platte waren wie folgt:

- Der Rippenabstand ( $a = e_{\text{rippe}}$ ) wurde konstant mit 1000 mm angenommen.
- Der Basiswert für die Breite der Platte  $b$  wurde mit 500 mm angesetzt und in 100 mm Schritten bis auf eine maximale Breite von 3000 mm vergrößert.
- Der Basiswert des Auflagerabstandes des Rippensteeges wurde mit  $l_i = 900$  mm angenommen und wurde ebenfalls in 100 mm Schritten bis zum Minimalwert von 500 mm verändert.
- Die Dicke  $t$  der Platte war mit 2 mm festgelegt.

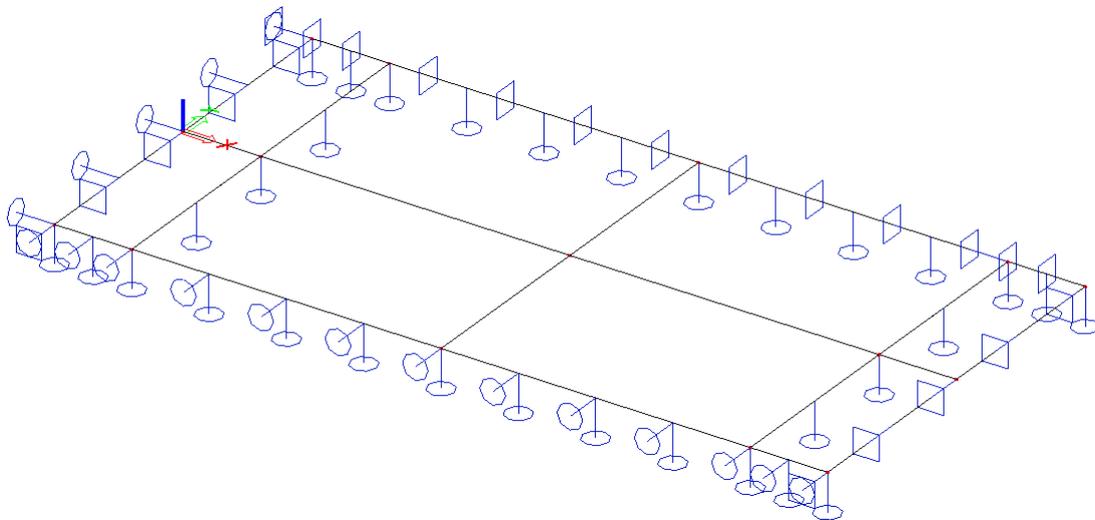
### 2.1.5 Auflagerbedingungen

Da sich die Auflagerbedingungen eines Plattenelements am Fußpunkt der Stauhaut von allen übrigen Elementen unterscheiden, erfolgte die Spannungs- und Verformungsberechnung getrennt für zwei verschiedene Auflagertypen. Die Auflagerbedingungen entlang der Seiten  $b$  sowie am oberen Rand sind für beide Platten identisch. Dort ist die Platte jeweils eingespannt gelagert. Dies resultiert aus der Symmetriewirkung zum benachbarten Feld sowie aus der für die Plattenlagerung günstigen Beckenkopfausbildung. Die Lagerung unterscheidet sich somit nur durch die unterschiedlichen Bedingungen an den Fußpunkten. Der erste Plattentyp ist am Fußpunkt für sämtliche  $a/b$ -Verhältnisse starr gelagert. Der zweite Plattentyp ist am Fußpunkt gelenkig gelagert und entspricht

dem Übergang von Stauhaut zu Bodenblech des Beckens. Abbildung 5 zeigt die Auflagerbedingungen der beiden Platten.



(a) Auflagerbedingungen Platte 1

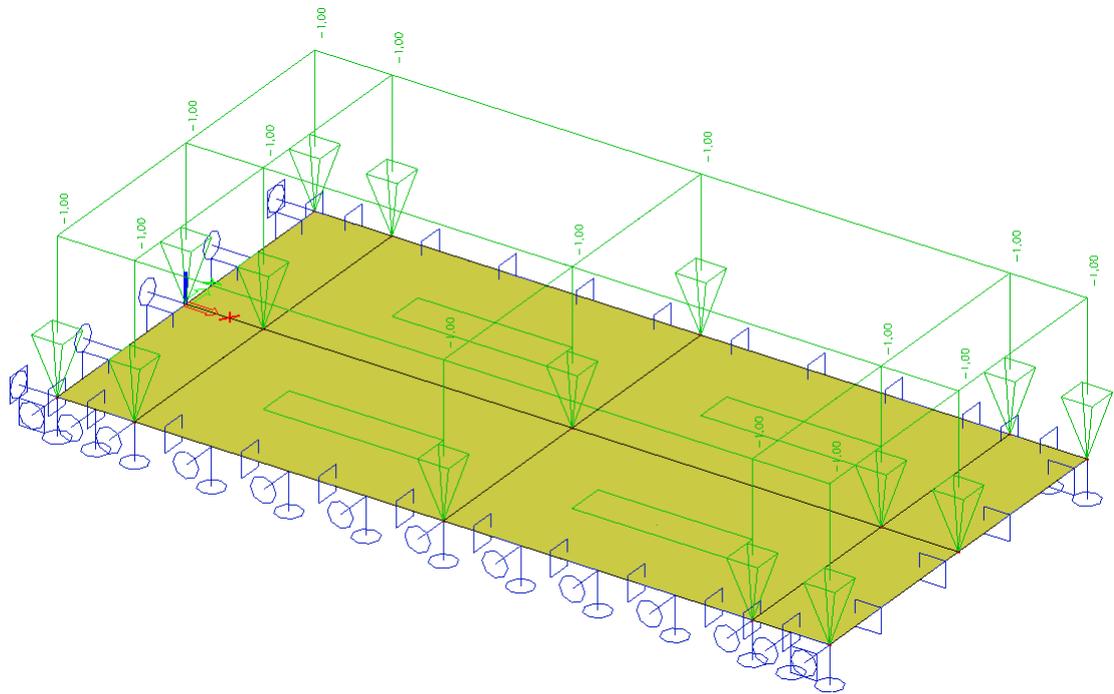


(b) Auflagerbedingungen Platte 2

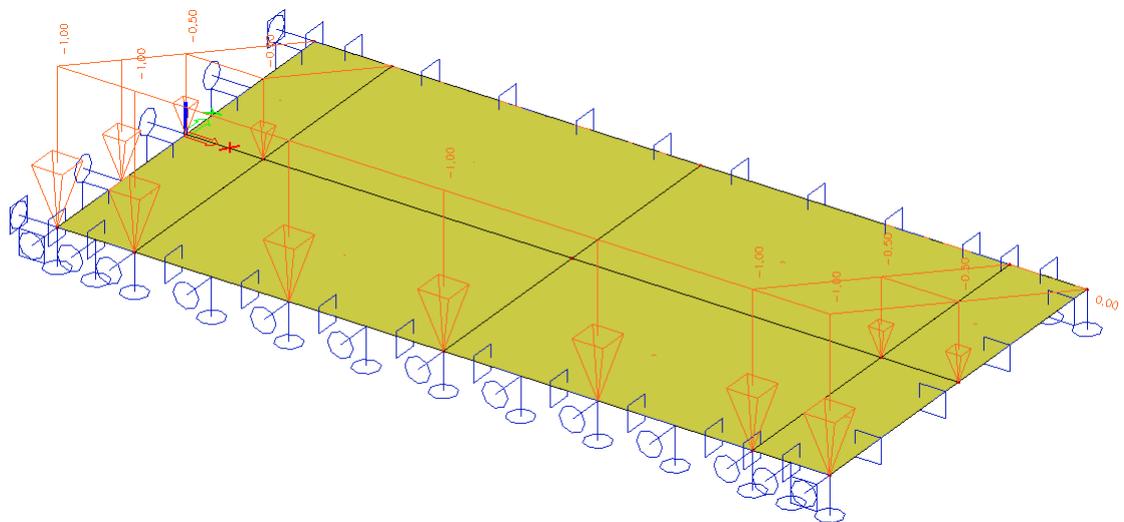
Abbildung 5: Auflagerbedingungen der Einzelplatten

### 2.1.6 Lastfälle

Um alle möglichen Einwirkungen und deren Kombinationen auf die Stauhaut erfassen zu können, wurden zwei verschiedene Lastfälle untersucht. Als Lastfall 1 (LF 1) wurde eine Gleichlast über die Stauhaut definiert. Als zweiten Lastfall (LF 2) wurde eine Dreieckslast angenommen. Beide Lastfälle wurden als Einheitslastfälle definiert. Somit können alle linearen Lastbilder (Gleichlast, Dreieckslast, Trapezlast) mit Hilfe der beiden Einzellastfälle durch Superposition modelliert werden. Abbildung 6a und 6b zeigen die beiden untersuchten Lastfälle.



(a) Lastfall Gleichlast



(b) Lastfall Dreieckslast

Abbildung 6: Lastfälle für die Plattenberechnung

### 2.1.7 Berechnungsparameter

Um die tatsächlichen, in der Stauhaut vorhandenen, Verformungen und Spannungen zu erhalten, wurden folgende Eingabeparamter vor der ersten Berechnung definiert:

- Das Finite-Elemente Netz (FE-Netz) wurde mit mindestens 50000 Knoten festgelegt. Die Größe des Netzes wird durch die Anzahl der Knoten bestimmt und ist ein Maß für die

Genauigkeit der Berechnung. Die Knotenanzahl wurde absichtlich hoch gehalten um möglichst genau Werte zu erreichen und Rundungsfehler auszuschließen. Es wurden ausschließlich rechteckige Plattenelemente für die FE-Berechnung verwendet.

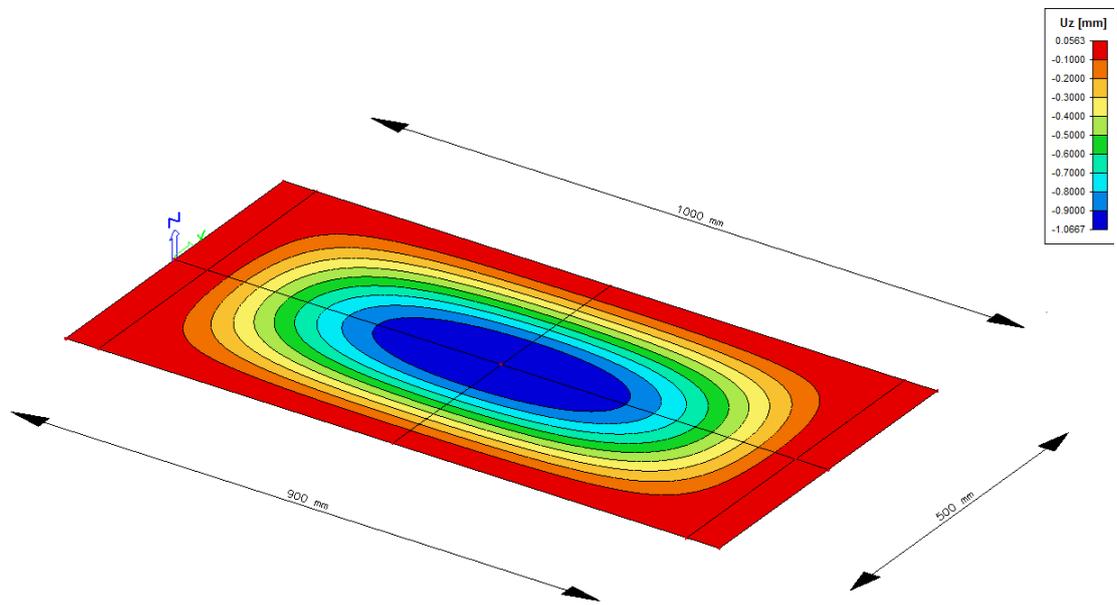
- Die Berechnung erfolgte linear-elastisch. Die Effekte aus Theorie II.Ordnung wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt.
- Weiters wurde die Querschnittsfläche der Stauhaut bei der Ermittlung miteinbezogen, d.h., dass auch Schubverformungen in die Ergebnisse einfließen. Da es in Wirklichkeit auch zur Erhöhung der Verformungen aufgrund von Schub kommt, wurde diese Annahme getroffen.
- Es wurden folgende  $a/b$ -Verhältnisse untersucht: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0.
- Die Abfolge der einzelnen Berechnungen erfolgte nach folgendem Prinzip: Für jedes einzelne  $a/b$ -Verhältnis wurde die Berechnung mit  $l_i = 900$  mm,  $l_i = 800$  mm,  $l_i = 700$  mm,  $l_i = 600$  mm und  $l_i = 500$  mm durchgeführt, was einer Breite der verwendeten Rippen von jeweils 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm bzw. 500 mm entspricht.

### 2.1.8 Ergebnisse

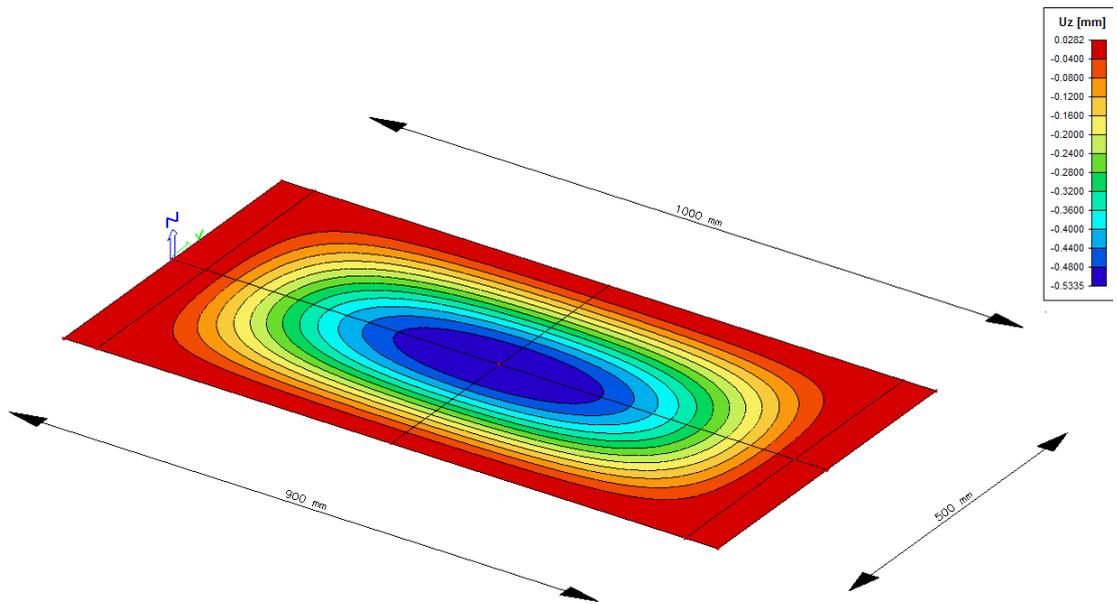
Die Berechnungen wurden mit den oben angeführten Berechnungsparametern durchgeführt. Es wurden für jede Plattenberechnung folgende maximalen und minimalen Spannungen bzw. Verformungen angegeben:

- Spannungen in x-Richtung:  $\sigma_{x,Rand}$ ,  $\sigma_{x,Stütz}$  und  $\sigma_{x,mitte}$
- Spannungen in y-Richtung:  $\sigma_{y,oben}$ ,  $\sigma_{y,mitte}$  und  $\sigma_{y,unten}$
- Verformungen in y-Richtung:  $u_{Rand}$ ,  $u_{Feld}$  und  $u_{Gesamt}$

Die folgenden Abbildungen zeigen die graphischen Ergebnisse der Berechnung für das  $a/b$ -Verhältnis von 0,5. Es werden die Ergebnisse der Verformungsberechnung und die der Spannungsberechnung (Spannungen an Plattenoberseite) für den Plattentyp 1 (eingespannter Fußpunkt) für beide Lastfälle dargestellt.

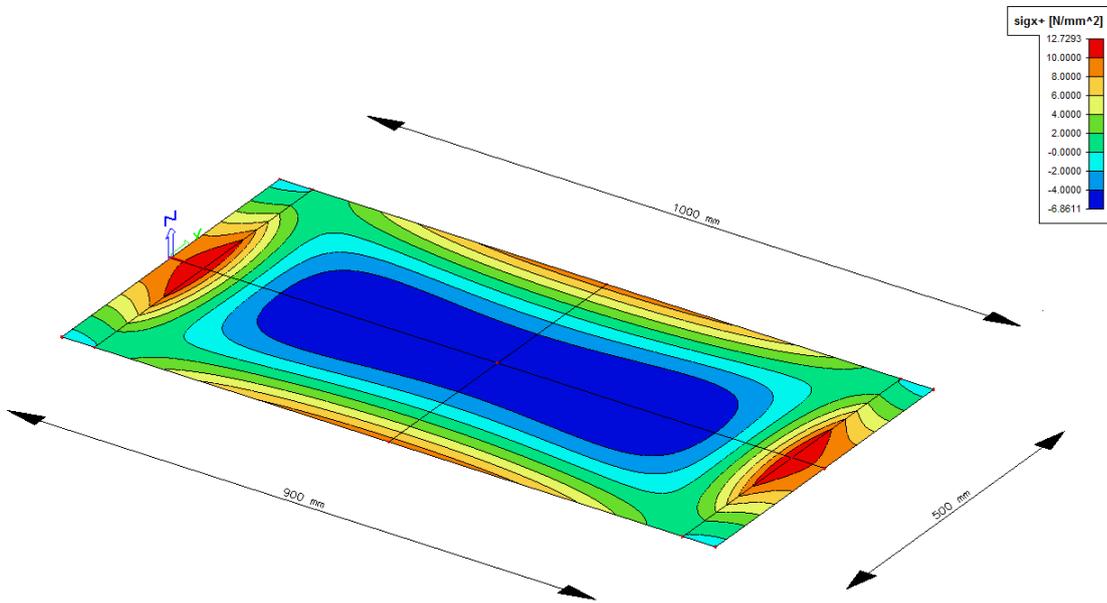


(a) Verformung  $U_z$  aufgrund Gleichlast

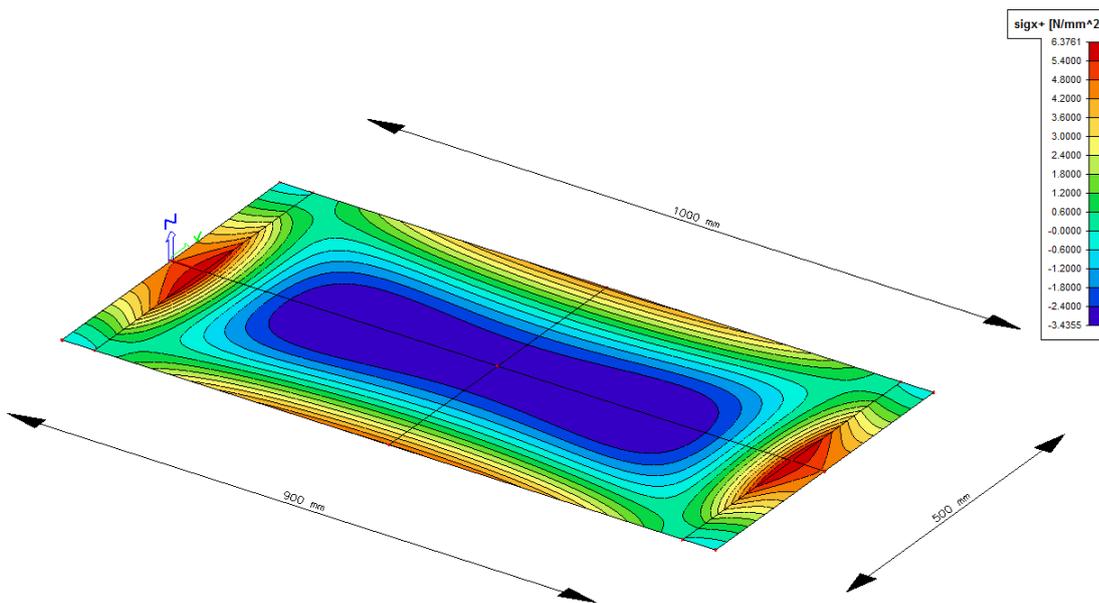


(b) Verformung  $U_z$  aufgrund Dreieckslast

Abbildung 7: Verformungen  $U_z$  für Seitenverhältnis  $a/b = 0,5$



(a) Grundspannung  $\sigma_x$  aufgrund Gleichlast



(b) Grundspannung  $\sigma_x$  aufgrund Dreieckslast

Abbildung 8: Grundspannungen  $\sigma_x$  für Seitenverhältnis  $a/b = 0,5$

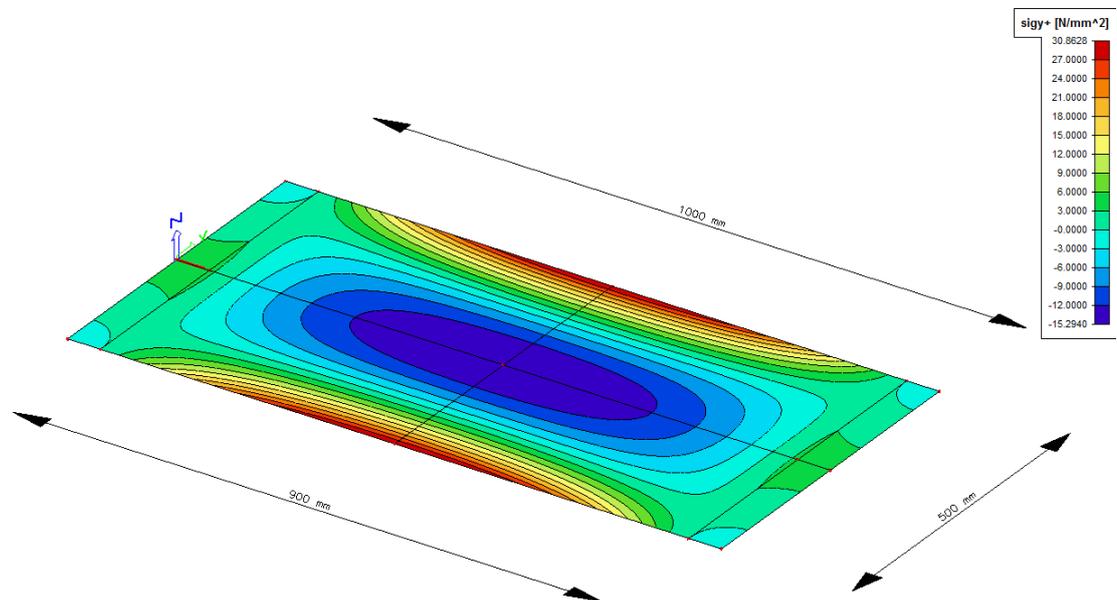
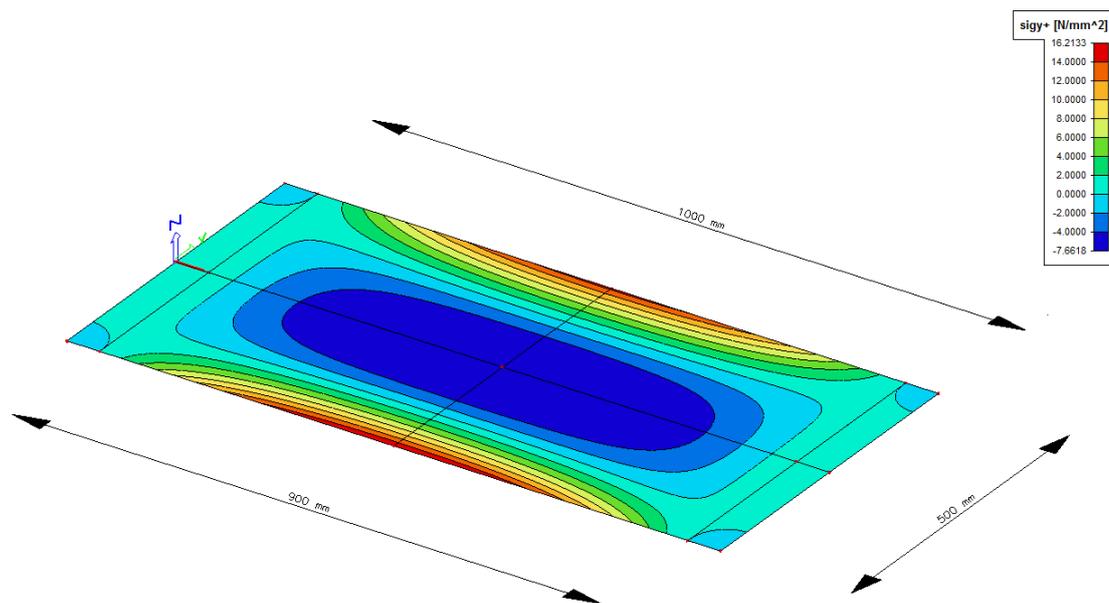
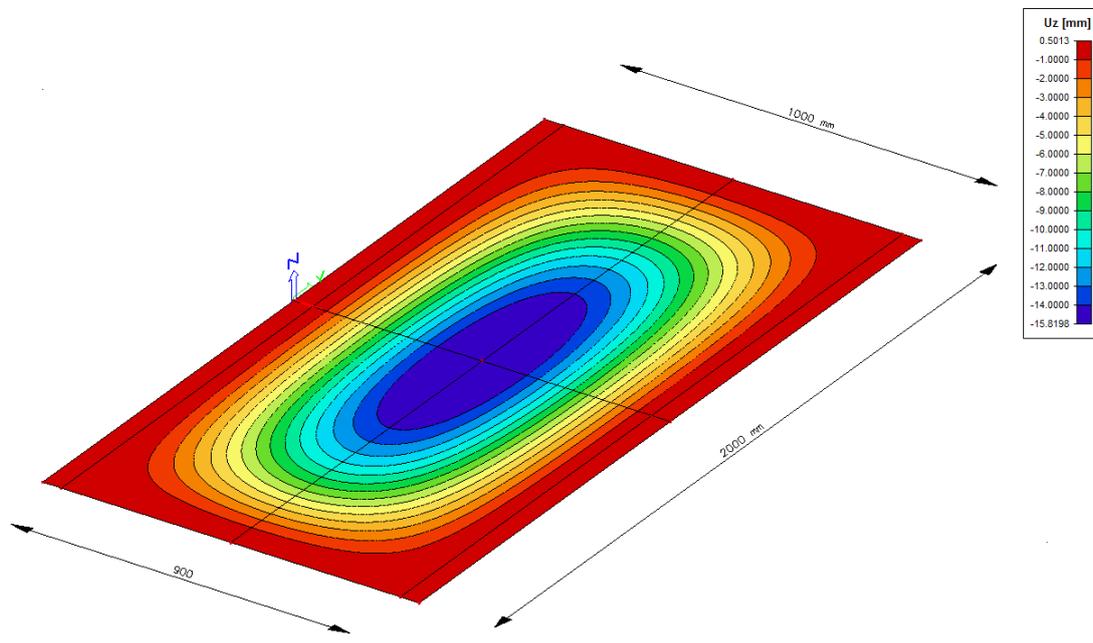
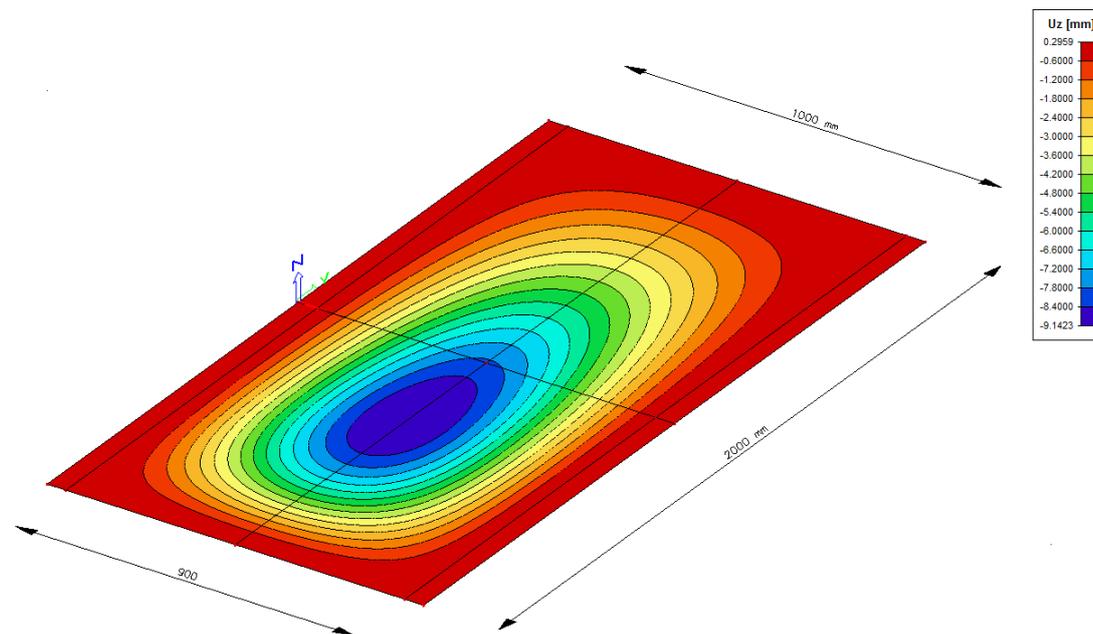

 (a) Grundspannung  $\sigma_y$  aufgrund Gleichlast

 (b) Grundspannung  $\sigma_y$  aufgrund Dreieckslast

 Abbildung 9: Grundspannungen  $\sigma_y$  für Seitenverhältnis  $a/b = 0,5$ 

Zum Vergleich zeigen die folgenden Abbildungen die Ergebnisse der Berechnung für das  $a/b$ -Verhältnis von 2,0. Es werden, wie zuvor, die Ergebnisse der Verformungsberechnung und die der Spannungsberechnung (Spannungen an Plattenseite für Plattentyp 1) für beide Lastfälle dargestellt.

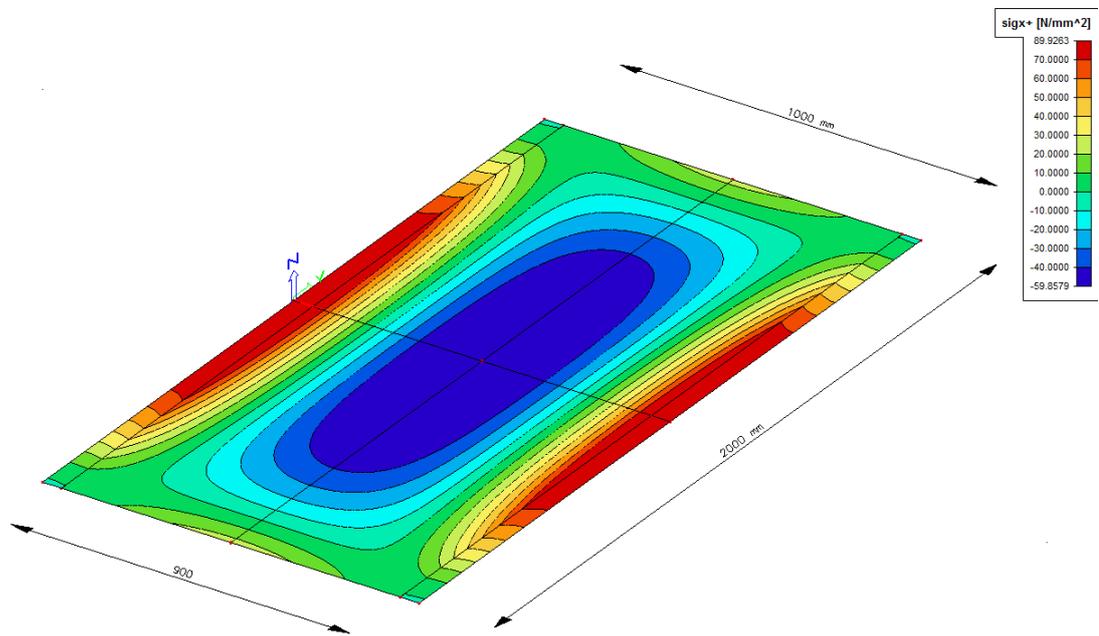


(a) Verformung  $U_z$  aufgrund Gleichlast

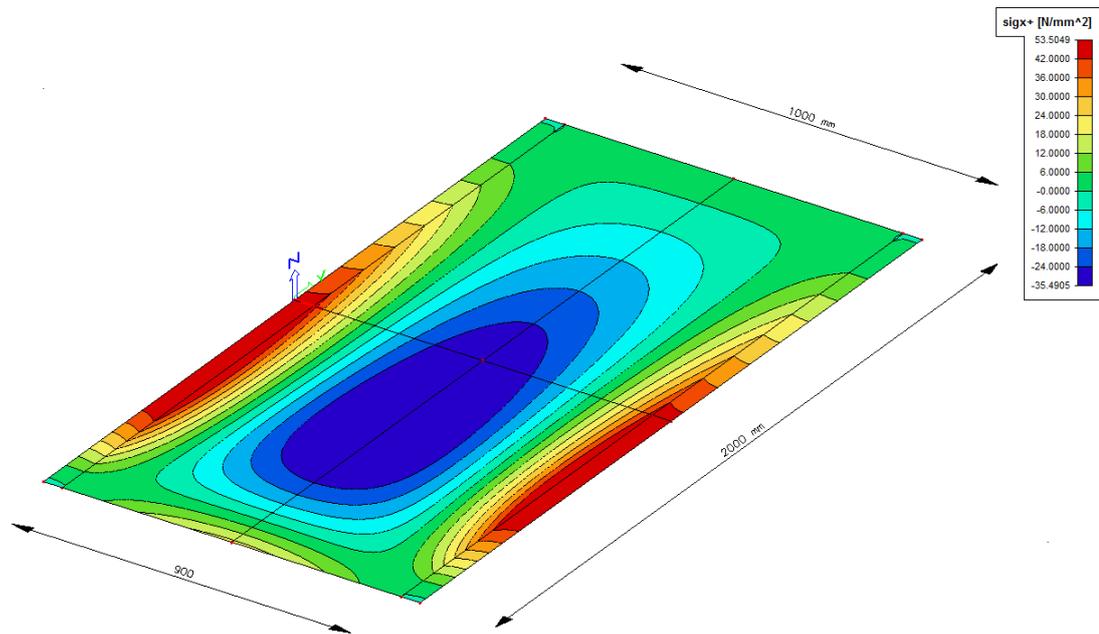


(b) Verformung  $U_z$  aufgrund Dreieckslast

Abbildung 10: Verformungen  $U_z$  für Seitenverhältnis  $a/b = 2,0$



(a) Grundspannung  $\sigma_x$  aufgrund Gleichlast



(b) Grundspannung  $\sigma_x$  aufgrund Dreieckslast

Abbildung 11: Grundspannungen  $\sigma_x$  für Seitenverhältnis  $a/b = 2,0$

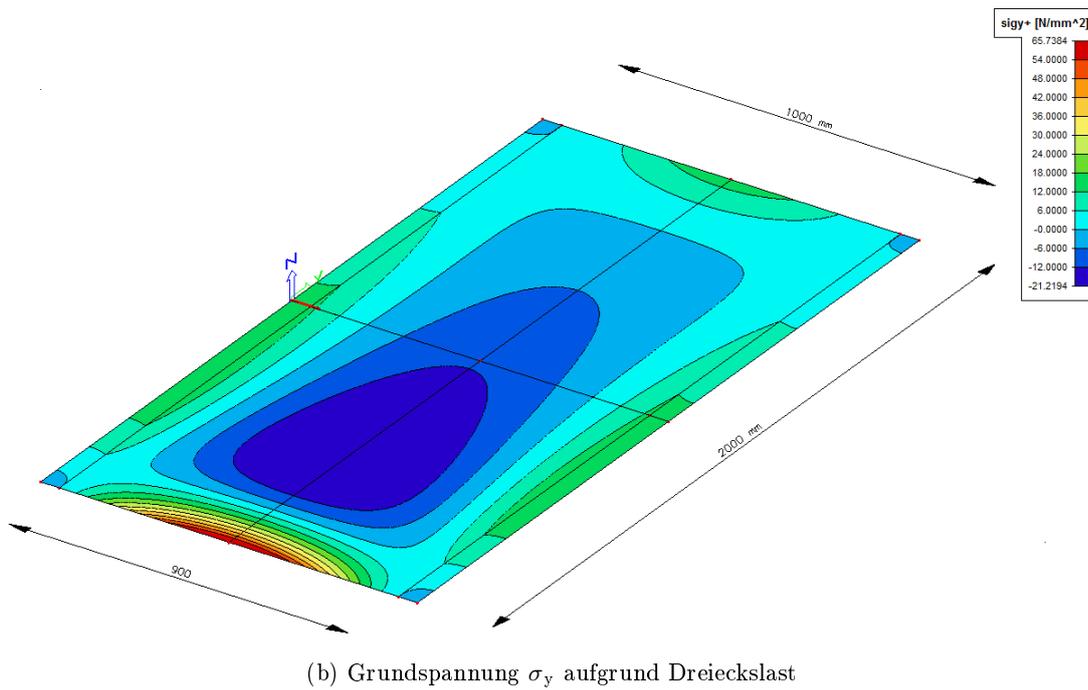
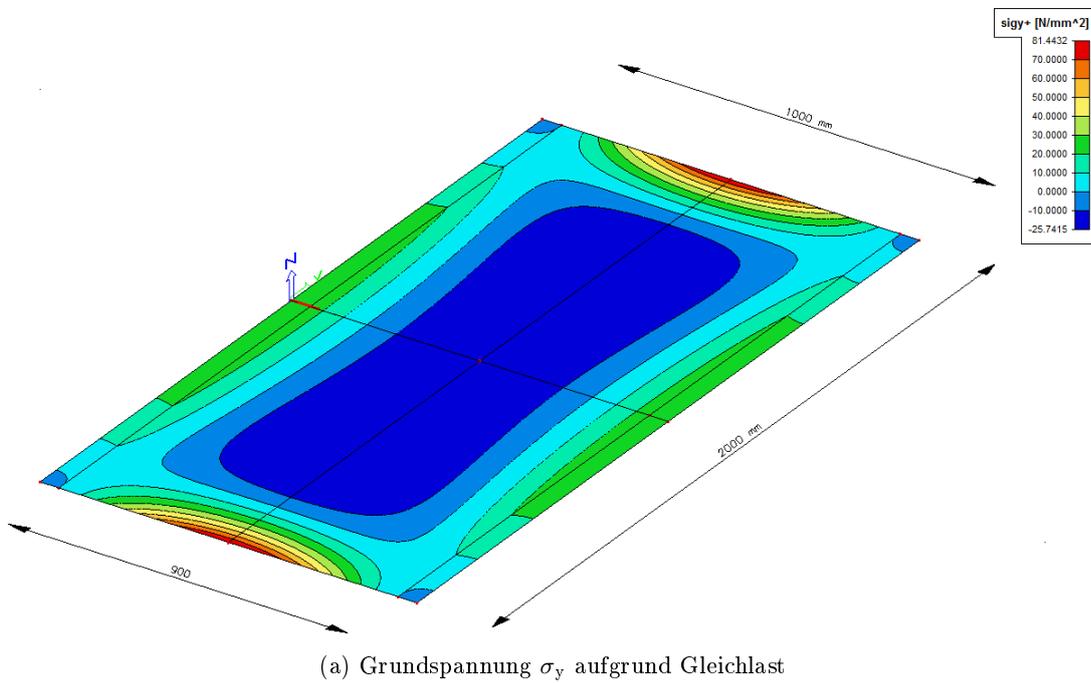


Abbildung 12: Grundspannungen  $\sigma_y$  für Seitenverhältnis  $a/b = 2,0$

Nach diesen Berechnungen wird bereits ersichtlich, dass sowohl die Spannungswerte als auch die Werte der Verformungen mit steigenden  $a/b$ -Verhältnissen zunehmen. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse dieser beiden Berechnungen angeführt.

	Gleichlast								
	Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
	$u_{\text{Rand}}$	$u_{\text{Feld}}$	$u_{\text{Gesamt}}$	$\sigma_{x,\text{Rand}}$	$\sigma_{x,\text{Stütz}}$	$\sigma_{x,\text{mitte}}$	$\sigma_{y,\text{unten}}$	$\sigma_{y,\text{mitte}}$	$\sigma_{y,\text{oben}}$
$a/b = 0,5$ $l_i/a = 0,9$	0,0563	-1,0667	1,1230	9,5493	12,7293	-6,8611	30,8628	-15,2940	30,8628
$a/b = 2,0$ $l_i/a = 0,9$	0,5013	-15,8193	16,3206	87,8255	89,9263	-59,8579	81,4432	-25,7415	81,4432

	Dreieckslast								
	Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
	$u_{\text{Rand}}$	$u_{\text{Feld}}$	$u_{\text{Gesamt}}$	$\sigma_{x,\text{Rand}}$	$\sigma_{x,\text{Stütz}}$	$\sigma_{x,\text{mitte}}$	$\sigma_{y,\text{unten}}$	$\sigma_{y,\text{mitte}}$	$\sigma_{y,\text{oben}}$
$a/b = 0,5$ $l_i/a = 0,9$	0,0284	-0,5362	0,5646	4,7746	6,3761	-3,4355	16,2133	-7,6618	12,3039
$a/b = 2,0$ $l_i/a = 0,9$	0,2959	-9,1420	9,4379	51,8104	53,5049	-35,4905	65,7384	-21,2194	15,7045

 Abbildung 13: Ergebnisse der FE-Berechnung für  $a/b = 0,5$  und  $a/b = 2,0$  mit  $l_i/a = 0,9$

### 2.1.9 Vergleich mit analytischen Lösungen

Für den Grundfall der allseitig gelenkig gelagerten bzw. eingespannten Rechteckplatte mit den Materialkennwerten wie unter Abschnitt 2.1.2 wurden für je zwei Geometrieverhältnisse ( $a/b = 1,0$  bzw.  $a/b = 2,0$ ) und je zwei Belastungsarten (Gleichlast, Dreiecklast) Vergleiche zwischen der SCIA-Berechnung und der analytischen Lösung nach Warren C. Young (1997) durchgeführt. Die Ergebnisse sind wie folgt:

Gleichlast				Dreiecklast			
	Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]			Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	
<b>a/b = 1,0</b>	$u_z$	$\sigma_{x,Rand}$	$\sigma_{x,mitte}$	<b>a/b = 1,0</b>	$u_z$	$\sigma_{y,Rand}$	$\sigma_{y,mitte}$
Roark	8,6250	-76,9500	34,6500	Roark	4,6250	-42,1500	34,6500
SCIA Engineer	8,6358	-77,0020	34,3590	SCIA Engineer	4,3897	-46,8420	34,3590
$\Delta \%$	<b>0,13%</b>	<b>0,07%</b>	<b>0,84%</b>	$\Delta \%$	<b>5,09%</b>	<b>11,13%</b>	<b>0,84%</b>

Gleichlast				Dreiecklast			
	Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]			Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	
<b>a/b = 2,0</b>	$u_z$	$\sigma_{x,Rand}$	$\sigma_{x,mitte}$	<b>a/b = 2,0</b>	$u_z$	$\sigma_{y,Rand}$	$\sigma_{y,mitte}$
Roark	17,3125	-12,4350	61,8000	Roark	8,5000	-76,7000	47,7000
SCIA Engineer	17,2873	-12,4299	61,7320	SCIA Engineer	8,6894	-74,6590	49,6400
$\Delta \%$	<b>0,15%</b>	<b>0,04%</b>	<b>0,11%</b>	$\Delta \%$	<b>2,23%</b>	<b>2,66%</b>	<b>4,07%</b>

(a) Ergebnisse der Vergleichsrechnung für allseitig starr gelagerte Platte

Gleichlast			Dreiecklast		
	Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]		Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>a/b = 1,0</b>	$u_z$	$\sigma_{x,mitte}$	<b>a/b = 1,0</b>	$u_z$	$\sigma_{y,mitte}$
Roark	27,7500	71,8500	Roark	13,7500	40,0000
SCIA Engineer	27,7480	71,8750	SCIA Engineer	14,0310	40,0510
$\Delta \%$	<b>0,01%</b>	<b>0,03%</b>	$\Delta \%$	<b>2,04%</b>	<b>0,13%</b>

Gleichlast			Dreiecklast		
	Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]		Verformung [mm]	Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>a/b = 2,0</b>	$u_z$	$\sigma_{x,mitte}$	<b>a/b = 2,0</b>	$u_z$	$\sigma_{y,mitte}$
Roark	69,3750	152,5500	Roark	37,5000	85,0000
SCIA Engineer	69,1357	152,5710	SCIA Engineer	37,1261	83,9920
$\Delta \%$	<b>0,34%</b>	<b>0,01%</b>	$\Delta \%$	<b>1,00%</b>	<b>1,19%</b>

(b) Ergebnisse der Vergleichsrechnung für allseitig gelenkig gelagerte Platte

Abbildung 14: Vergleich der Ergebnisse von FE-Berechnung mit analytischen Lösungen

## 2.2 Implementierung der Plattentragwirkung ins Bemessungstool

Die Ergebnisse der FE-Plattenberechnung wurden tabellarisch nach  $a/b$ -Verhältnissen bzw.  $l_i/a$ -Verhältnissen gesammelt. Der Grundgedanke hinter der FE-Berechnung war, die berechneten Plattenverformungen- und Spannungen mit den angeführten Auflagerbedingungen mittels analytischen Formeln zu dimensionslosen Beiwerten umzurechnen um mit deren Hilfe bei frei definierbarer linearer Belastung, Dicke der Platte, Elastizitätsmodul und Seitenlänge für jede beliebige Platte bei selben Auflagerbedingungen Verformungs- und Spannungswerte berechnen zu können. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse nach Warren C. Young (1997) zu Verformungs- und Biegemomentbeiwerte zurückgerechnet. Da in den Formeln nach Warren C. Young (1997) immer die kürzere Seite der beiden Plattenabmessungen in der Berechnung enthalten ist, ergeben sich für  $a/b < 1$  und  $a/b > 1$  zwei verschiedene Formeln, die sich jeweils nur durch die verwendete Seitenlänge unterscheiden. Für Seitenverhältnisse  $a/b < 1$  ist die kürzere Seite jeweils die Seitenlänge  $a$ , welche auch in die Berechnung der  $k_b$ -Werte aufgenommen wurde. Für Platten mit einem Verhältnis

$a/b > 1$  fließt stets die Abmessung  $b$  in die Berechnung ein, da diese bei gegebenen geometrischen Bedingungen, die kürzere der beiden Plattenseiten ist. Die dimensionslosen Verformungsbeiwerte wurden aus Gleichung (1) für  $a/b < 1$  und aus Gleichung (2) für  $a/b > 1$  errechnet.

$$u_{max} = k_{b,u} \cdot \frac{12 \cdot p_{max} \cdot a^4}{E \cdot t^3} \cdot (1 - \nu^2) \quad [mm] \quad (1)$$

$$u_{max} = k_{b,u} \cdot \frac{12 \cdot p_{max} \cdot b^4}{E \cdot t^3} \cdot (1 - \nu^2) \quad [mm] \quad (2)$$

Mit:

$u_{max}$	maximale Durchbiegung in mm
$k_{b,u}$	Verformungsbeiwert
$p_{max}$	Einwirkung in KN/m <sup>2</sup>
$a, b$	Seitenabmessungen der Platte in mm
$E$	Elastizitätsmodul in N/mm <sup>2</sup>
$t$	Dicke der Platte in mm
$\nu$	Querdehnungszahl

ergeben sich die  $k_b$ -Verformungsbeiwerte nach Gleichung (3) bzw. (4).

$$k_{b,u} = u_{max} \cdot \frac{E \cdot t^3}{p_{max} \cdot a^4 \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad [-] \quad (3)$$

$$k_{b,u} = u_{max} \cdot \frac{E \cdot t^3}{p_{max} \cdot b^4 \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad [-] \quad (4)$$

Analog zur Berechnung der Verformungsbeiwerte wurde die Berechnung der Spannungsbeiwerte durchgeführt. Wieder wurde die jeweils kleinere Seitenabmessung für die Berechnung der Beiwerte in  $x$ - und in  $y$ -Richtung herangezogen. Es ergaben sich aus den gegebenen Plattenformeln (5) und (6)

$$\sigma_{x,y} = k_{b,\sigma_x,\sigma_y} \cdot \frac{6 \cdot p_{max} \cdot a^2}{t^2} \quad [N/mm^2] \quad (5)$$

$$\sigma_{x,y} = k_{b,\sigma_x,\sigma_y} \cdot \frac{6 \cdot p_{max} \cdot b^2}{t^2} \quad [N/mm^2] \quad (6)$$

mit:

$\sigma_{x,y}$	Spannung in N/mm <sup>2</sup>
$k_{b,\sigma_x,\sigma_y}$	Spannungsbeiwerte
$p_{max}$	Einwirkung in KN/m <sup>2</sup>
$a, b$	Seitenabmessungen der Platte in mm
$t$	Dicke der Platte in mm

folgende Spannungsbeiwerte

$$k_{b,\sigma_x,\sigma_y} = \sigma_{x,y} \cdot \frac{t^2}{6 \cdot p_{max} \cdot a^2} \quad [-] \quad (7)$$

$$k_{b,\sigma_x,\sigma_y} = \sigma_{x,y} \cdot \frac{t^2}{6 \cdot p_{max} \cdot b^2} \quad [-] \quad (8)$$

---

Die somit erhaltenen Verformungs- und Spannungsbeiwerte wurden daraufhin in das *Bemessungstool* implementiert. Die ausführliche Beschreibung wie das Bemessungsprogramm die Verformungen und die Spannungen ermittelt, wird im Abschnitt Berechnungsablauf erläutert.

## 3 Vergleich der Ergebnisse der Plattenberechnung

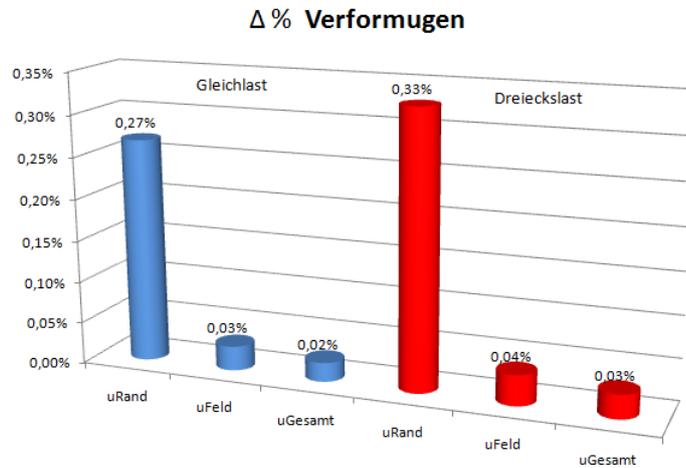
Um Gewissheit über die Richtigkeit der Ergebnisse der hier entwickelten Plattenberechnung zu gewinnen, wurden die Verformungs- und Spannungsergebnisse des Bemessungsprogrammes mit den Ergebnissen der FE-Software *SCIA* verglichen. In einem ersten Schritt erfolgte ein Vergleich bestimmter Einzelplatten, aus denen eine gesamte Stauhaut besteht, und im Anschluss wurde ein Vergleich der Ergebnisse von aneinandergereihten Einzelplatten durchgeführt, was einer Stauhaut mit horizontalen Rippen entspricht. Für alle Berechnungen wurde erneut eine Mindestgröße von 50.000 Elementen vorgegeben.

### 3.1 Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte

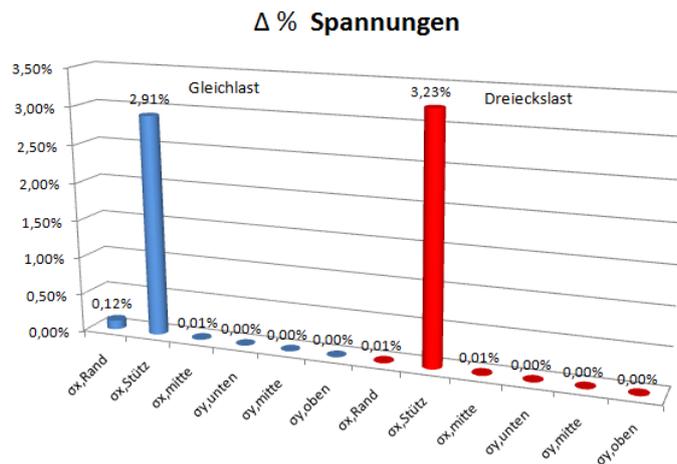
Es wurden Einzelplatten mit folgenden Parametern für die Vergleichsrechnung ausgewählt:

- $e_{\text{rippe}} = 1000 \text{ mm}$
- $b_{\text{rippe}} = 300 \text{ mm}$
- $l_i = 700 \text{ mm}$
- $t = 3 \text{ mm}$
- $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$
- Belastung: Gleichlast  $3 \text{ KN/m}^2$  bzw. eine Dreieckslast mit  $3 \text{ KN/m}^2$

Die erste Vergleichsrechnung erfolgte für ein Seitenverhältnis von  $a/b = 0,5$ . Abbildung 15a zeigt die Abweichungen der Ergebnisse der Verformungen der beiden Berechnungsarten und Abbildung 15b stellt die Abweichung der berechneten Spannungen in Prozent dar. Abbildung 16 zeigt die berechneten Werte der Vergleichsrechnung für das Seitenverhältnis  $a/b = 0,5$ . Wie in den nachfolgenden Ausführungen ersichtlich wird, sind die Unterschiede sehr klein, lediglich im Auflagerbereich der Vertikalrippen ergeben sich Differenzen aus Gründen der FE-Netzgröße.



(a) Differenzen der Verformungsergebnisse



(b) Differenzen der Spannungsergebnisse

Abbildung 15: Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit a/b = 0,5

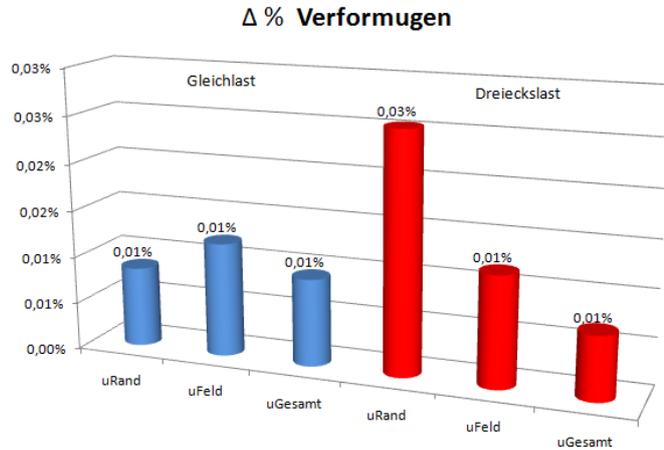
		Gleichlast								
a=500		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 0,5		u <sub>Rand</sub>	u <sub>Feld</sub>	u <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0596	-2,7239	2,7835	-16,6429	68,6929	-34,4631	124,5133	-60,3502	124,5133
SCIA Engineer		0,0594	-2,7247	2,7841	-16,6234	66,6929	-34,4660	124,5126	-60,3509	124,5126
Δ %		0,27%	0,03%	0,02%	0,12%	2,91%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%

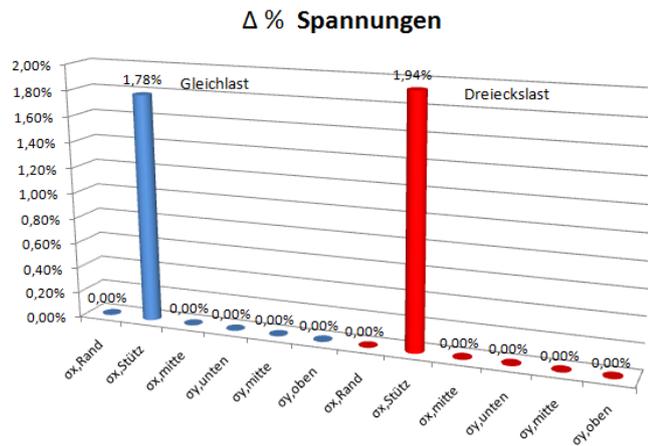
		Dreieckslast								
a=500		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 0,5		u <sub>Rand</sub>	u <sub>Feld</sub>	u <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0305	-1,3716	1,4021	-10,1911	36,4960	-17,5244	76,0507	-31,4440	48,4631
SCIA Engineer		0,0304	-1,3721	1,4025	-10,1919	35,3171	-17,5260	76,0491	-31,4444	48,4635
Δ %		0,33%	0,04%	0,03%	0,01%	3,23%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%

Abbildung 16: Werte der Vergleichsrechnung für a/b = 0,5

Die zweite Vergleichsrechnung erfolgte für das Seitenverhältnis  $a/b = 1,0$ .



(a) Differenzen der Verformungsergebnisse



(b) Differenzen der Spannungsergebnisse

Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit  $a/b = 1,0$

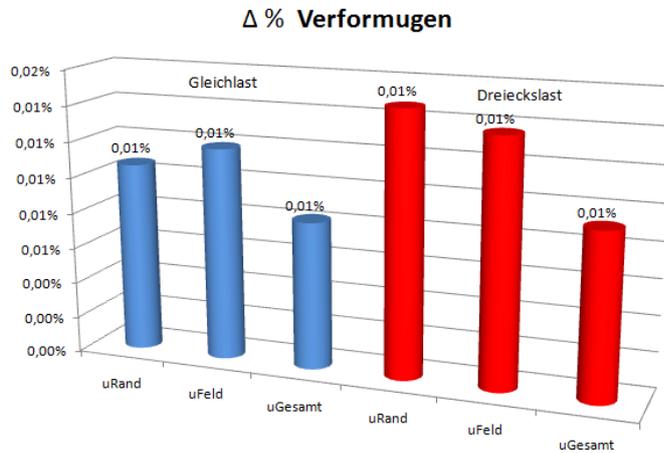
		Gleichlast								
a=1000		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 1,0		u <sub>Rand</sub>	u <sub>Feld</sub>	u <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x, Rand</sub>	σ <sub>x, Stütz</sub>	σ <sub>x, mitte</sub>	σ <sub>y, unten</sub>	σ <sub>y, mitte</sub>	σ <sub>y, oben</sub>
Bemessungstool		2,3478	-14,8581	17,2059	55,6427	153,7782	-136,7991	236,4516	-96,3164	236,4516
SCIA Engineer		2,3476	-14,8599	17,2075	55,6444	151,0392	-136,8016	236,4466	-96,3174	236,4466
Δ %		0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	1,78%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

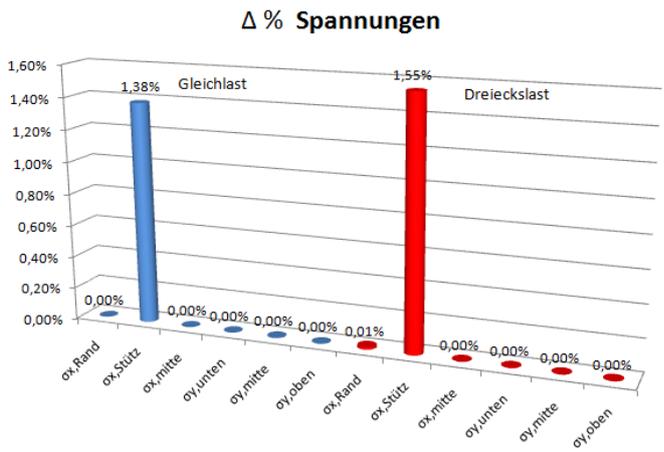
		Dreieckslast								
a=1000		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 1,0		u <sub>Rand</sub>	u <sub>Feld</sub>	u <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x, Rand</sub>	σ <sub>x, Stütz</sub>	σ <sub>x, mitte</sub>	σ <sub>y, unten</sub>	σ <sub>y, mitte</sub>	σ <sub>y, oben</sub>
Bemessungstool		1,1787	-7,6439	8,8226	27,8222	84,1231	-71,5516	162,5276	-56,9578	73,9240
SCIA Engineer		1,1784	-7,6448	8,8232	27,8222	82,4949	-71,5530	162,5238	-56,9584	73,9229
Δ %		0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	1,94%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Abbildung 18: Werte der Vergleichsrechnung für  $a/b = 1,0$

Die letzte Vergleichsrechnung erfolgte für ein Seitenverhältnis von  $a/b = 2,0$ .



(a) Differenzen der Verformungsergebnisse



(b) Differenzen der Spannungsergebnisse

Abbildung 19: Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit  $a/b = 2,0$

		Gleichlast								
a=2000		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 2,0</b>		$u_{Rand}$	$u_{Feld}$	$u_{Gesamt}$	$\sigma_{x,Rand}$	$\sigma_{x,Stütz}$	$\sigma_{x,mitte}$	$\sigma_{y,unten}$	$\sigma_{y,mitte}$	$\sigma_{y,oben}$
Bemessungstool		4,7025	-24,4024	29,1049	125,2707	203,4329	-200,0382	250,4702	-79,2164	250,4702
SCIA Engineer		4,7020	-24,4053	29,1073	125,2706	200,6263	-200,0387	250,4673	-79,2189	250,4673
$\Delta \%$		0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	1,38%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

		Dreieckslast								
a=2000		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 2,0</b>		$u_{Rand}$	$u_{Feld}$	$u_{Gesamt}$	$\sigma_{x,Rand}$	$\sigma_{x,Stütz}$	$\sigma_{x,mitte}$	$\sigma_{y,unten}$	$\sigma_{y,mitte}$	$\sigma_{y,oben}$
Bemessungstool		2,7156	-14,6275	17,3431	71,3670	130,5756	-124,1680	207,7053	-66,1800	42,7649
SCIA Engineer		2,7152	-14,6295	17,3447	71,3775	128,5574	-124,1700	207,7022	-66,1799	42,7651
$\Delta \%$		0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	1,55%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Abbildung 20: Werte der Vergleichsrechnung für  $a/b = 2,0$

Auch die Ergebnisse der letzten Vergleichsrechnung bestätigen die aus den beiden vorhergehenden Vergleichsrechnungen gewonnenen Erkenntnisse. Aus allen Berechnungen wurde klar ersichtlich, dass die Verformungs- und Spannungsergebnisse der beiden Berechnungsarten sich nur im geringen Ausmaße unterscheiden. Vor allem bei der Verformungsberechnung stellte sich kaum ein Unterschied zwischen den Ergebnissen des *Bemessungstools* und der FE-Software ein. Die maximale Abweichung der Ergebnisse der Verformung beträgt 0,33 %. Die maximale Differenz bei der Spannungsvergleichsrechnung ist mit 3,23 % ebenfalls minimal. Zusätzlich zu den beiden dargestellten Plattenergebnissen wurde auch der Vergleich für eine Trittstufe mit einem a/b-Verhältnis von kleiner als 0,2 geführt. Auch diese Vergleichsrechnung führte zum selben Ergebnis und somit kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnung der Einzelplatte des Bemessungsprogrammes mit der FE-Rechnung im untersuchten Parameterbereich übereinstimmt.

## 3.2 Vergleich der Ergebnisse von aneinandergereihten Einzelplatten

Wie in der Vergleichsrechnung der Einzelplatten ersichtlich wurde, werden die Spannungen und Verformungen der Stauhaut mit zunehmendem a/b-Verhältnis immer größer. Aus diesem Grund können mehrere Einzelplatten unter Zwischenauflagerung an zusätzlichen, relative leichten Horizontalrippen aneinandergereiht werden, um die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten, d.h. um die zulässigen Spannungen und die maximalen Verformungen nicht zu überschreiten. Deshalb wurden nach den Vergleichsrechnungen der Einzelplatten die Ergebnisse von aneinandergereihten Einzelplatten verglichen. Es wurden zwei Vergleichsrechnungen mit drei bzw. neun aufeinanderfolgenden Platten durchgeführt. Die Vergleichsrechnung mit drei Einzelplatten stellt ein System ohne horizontale Rippen mit einer Trittstufe dar und die zweite Rechnung liefert die Ergebnisse einer Stauhaut mit jeweils vier horizontalen Rippen oberhalb der Trittstufe und vier horizontalen Rippen unterhalb der Trittstufe. Es wurden bewusst diese beiden Fälle zur Überprüfung der Ergebnisse des Bemessungstools herangezogen, da zum einen beide Systeme praxisbezogen sind und in dieser Weise zur Ausführung kommen können und zum anderen die beiden Systeme die beiden Extremfälle simulieren, nämlich eine Stauhaut, die keine horizontale Rippen besitzt und eine, welche möglichst viele horizontale Rippen aufweist. Die beiden Vergleichsrechnungen wurden jeweils mit dem auf die einzelnen Platten wirkenden hydrostatischen Druck durchgeführt.

### 3.2.1 Stauhaut ohne horizontale Rippen

Die erste Vergleichsrechnung wurde an einem System, welches nur aus drei Einzelplatten besteht, durchgeführt. Es besteht aus zwei Einzelplatten mit den Längen 1200 mm und 1000 mm und der Trittstufe mit einer Breite von 100 mm. Abbildung 21 zeigt die Plattengeometrie mit ihrer Belastung, welche mit einer Wasserlast angenommen wurde.

- Der Rippenabstand ( $e_{\text{rippe}}$ ) wurde konstant mit 500 mm angenommen.
- Die Rippenbreite wurde mit 150 mm angenommen und der lichte Auflagerabstand des Steifensteiges ergibt sich somit zu  $l_i = 350$  mm.
- Die Dicke  $t$  der Platte wurde mit 2 mm gewählt.

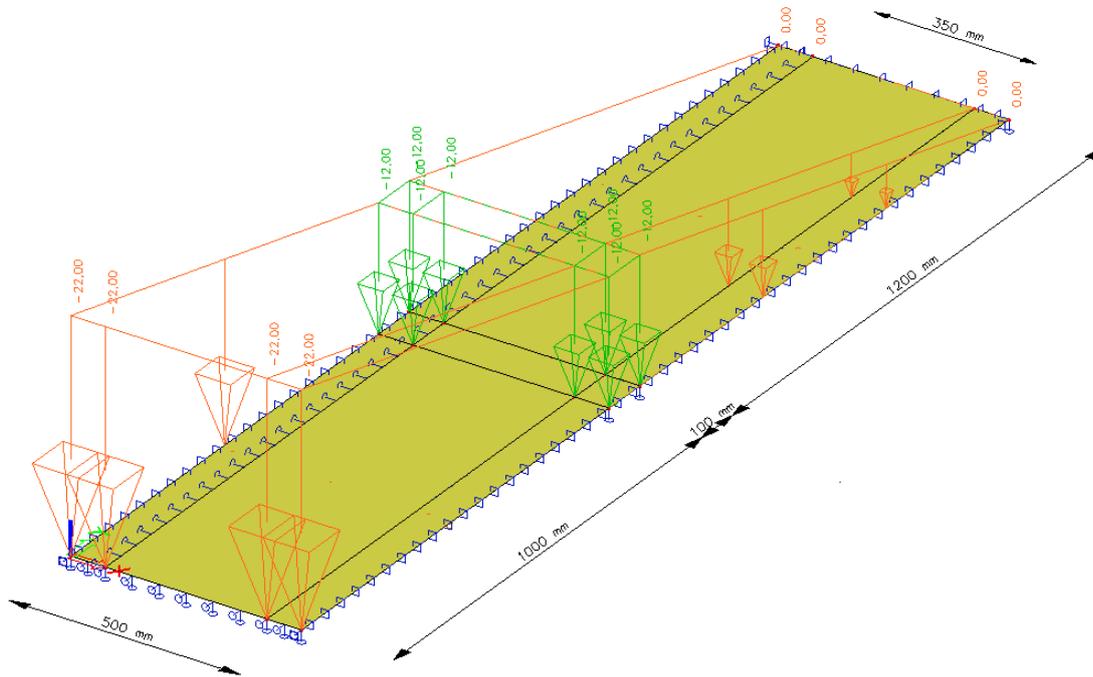


Abbildung 21: Stauhautvergleichsrechnung ohne horizontale Rippen

Die Abbildungen 22 und 23 zeigen die graphischen Ergebnisse der FE-Berechnung.

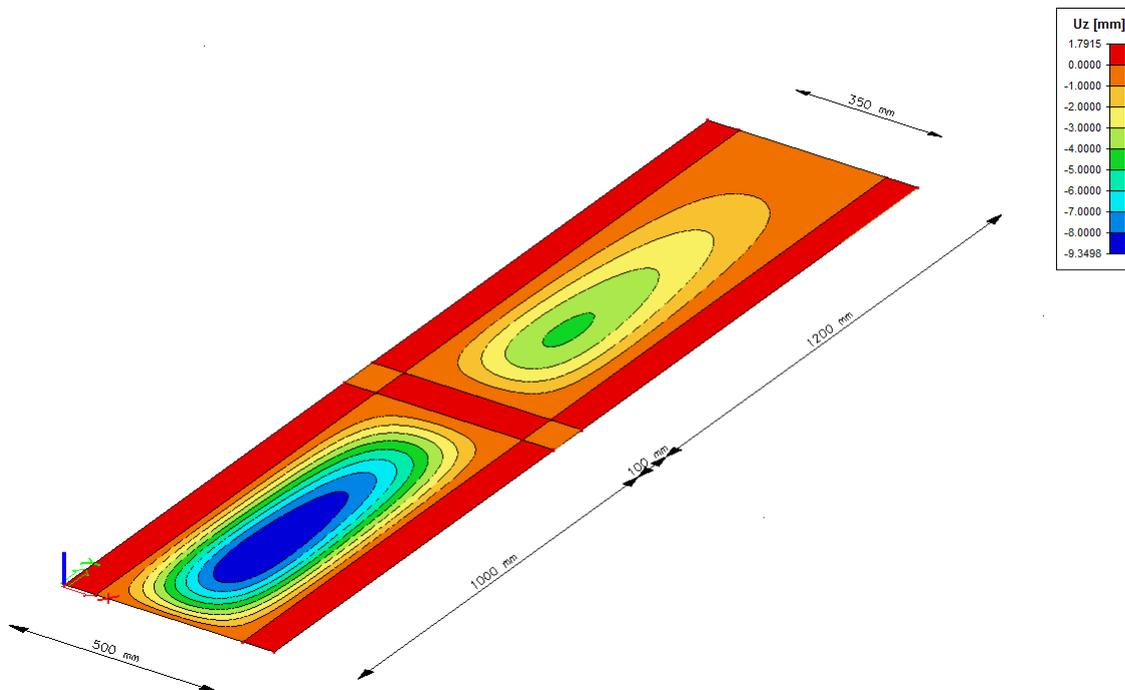
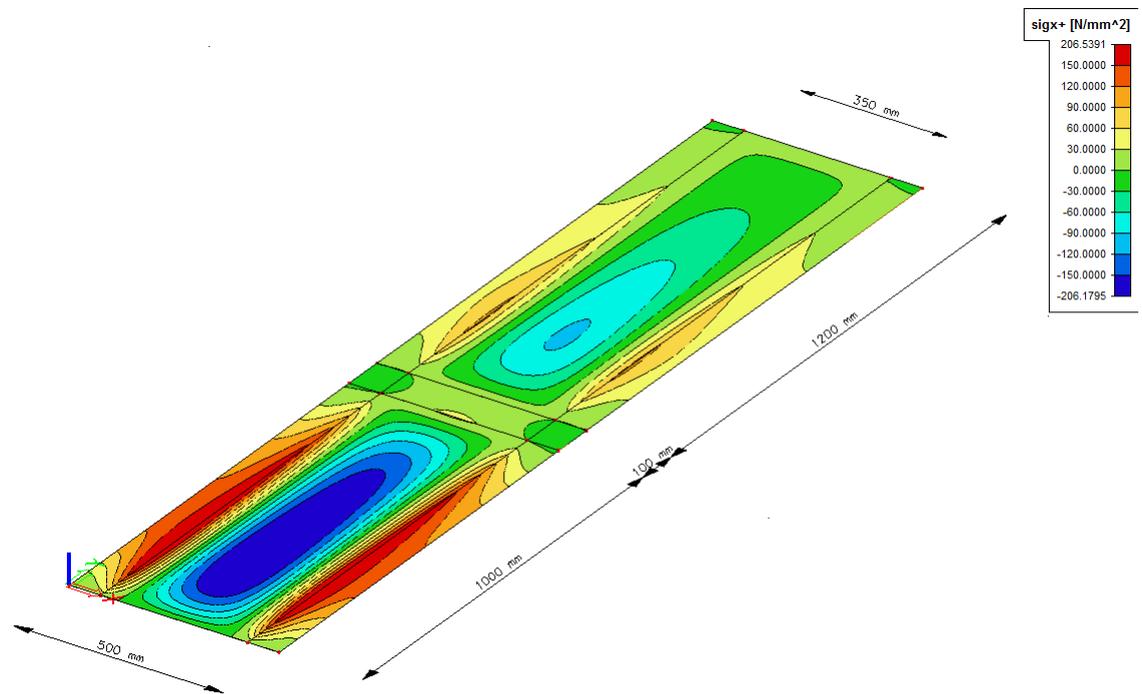
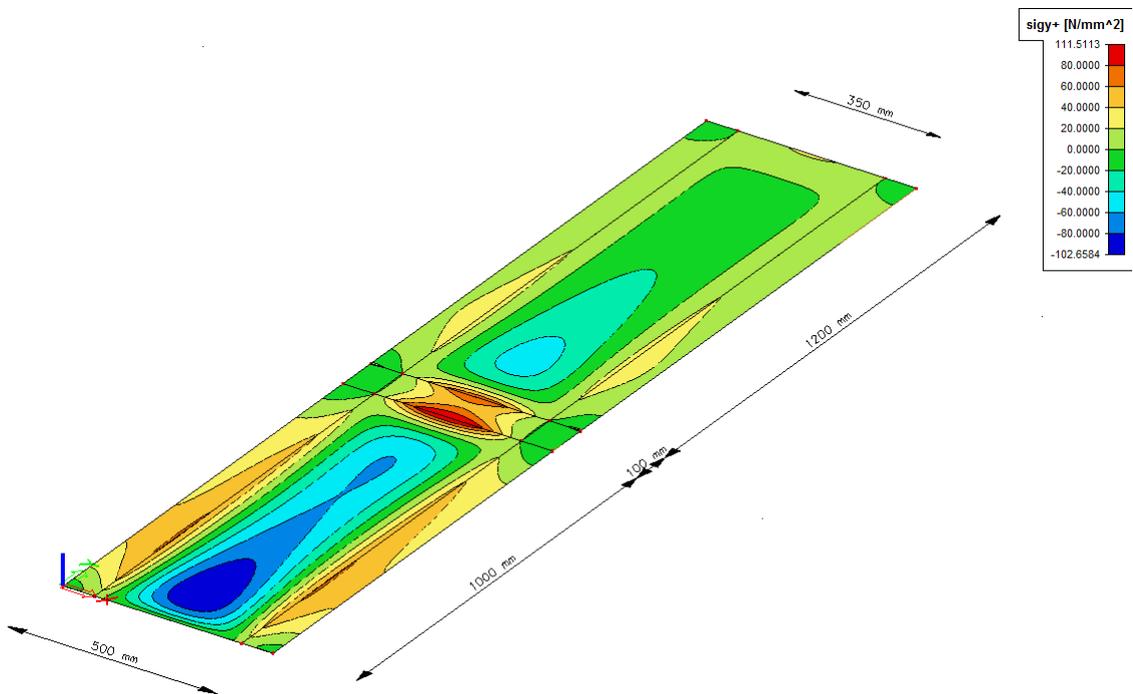


Abbildung 22: Verformung  $U_z$  für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen



(a) Grundspannung  $\sigma_x$  für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen



(b) Grundspannung  $\sigma_y$  für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen

Abbildung 23: Grundspannungen für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen

Abbildung 24 zeigt die Auflistung der Ergebnisse der FE-Rechnung und des *Bemessungstools* im Vergleich.

Teilplatte 1 a = 1200 mm	Wasserlast								
	Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 2,4	U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool	0,7573	-4,0336	4,7909	53,3201	94,3226	-90,4703	81,9262	-45,9445	24,2293
SCIA Engineer	0,7287	-4,1631	4,8918	55,1577	94,8487	-93,3054	76,4207	-47,6997	24,0311
Δ %	3,77%	3,21%	2,11%	3,45%	0,56%	3,13%	6,72%	3,82%	0,82%

Teilplatte 2 (TS) a = 100 mm	Wasserlast								
	Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 0,2	U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool	0,0000	-0,0215	0,0215	-3,6483	10,2492	21,5505	106,9219	71,8349	81,9262
SCIA Engineer	0,0783	0,3616	0,4379	-10,1374	-4,4588	24,8952	111,5113	66,0358	76,4207
Δ %	0,00%	1785,78%	1941,49%	177,87%	143,50%	15,52%	4,29%	8,07%	6,72%

Teilplatte 3 a = 1000 mm	Wasserlast								
	Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
a/b = 2,0	U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool	1,8359	-9,6135	11,4493	130,0578	217,9898	-212,2706	0,0751	-102,7752	106,9219
SCIA Engineer	1,7915	-9,3498	11,1413	127,1356	206,5391	-206,1795	0,0662	-102,6584	111,5113
Δ %	2,42%	2,74%	2,69%	2,25%	5,25%	2,87%	11,79%	0,11%	4,29%

Abbildung 24: Werte der Vergleichsrechnung für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen

### 3.2.2 Stauhaut mit horizontalen Rippen

Die zweite Vergleichsrechnung wurde mit einem System, welches aus insgesamt neun Einzelplatten besteht, durchgeführt. Abbildung 25 zeigt die Plattengeometrie mit ihrer Belastung, welche erneut mit einer Wasserlast angenommen wurde. Diese Vergleichsrechnung soll die Beckengeometrie mit horizontalen Rippen simulieren.

- Der Rippenabstand ( $e_{\text{rippe}}$ ) wurde bei dieser Vergleichsrechnung mit 625 mm angenommen.
- Die Rippenbreite betrug 150 mm und der Auflagerabstand des Steifensteiges somit  $l_1 = 475$  mm.
- Die Dicke  $t$  der Platte wurde erneut mit 2 mm festgelegt.

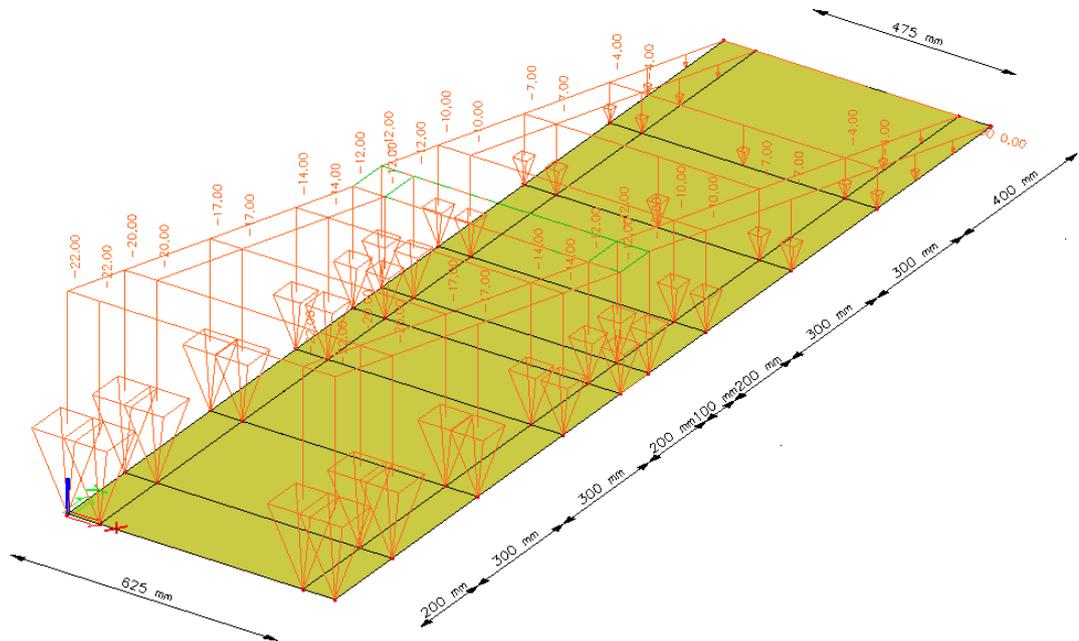


Abbildung 25: Stauhautvergleichsrechnung mit horizontalen Rippen

Die Abbildungen 26 und 27 zeigen die graphischen Ergebnisse der FE-Berechnung.

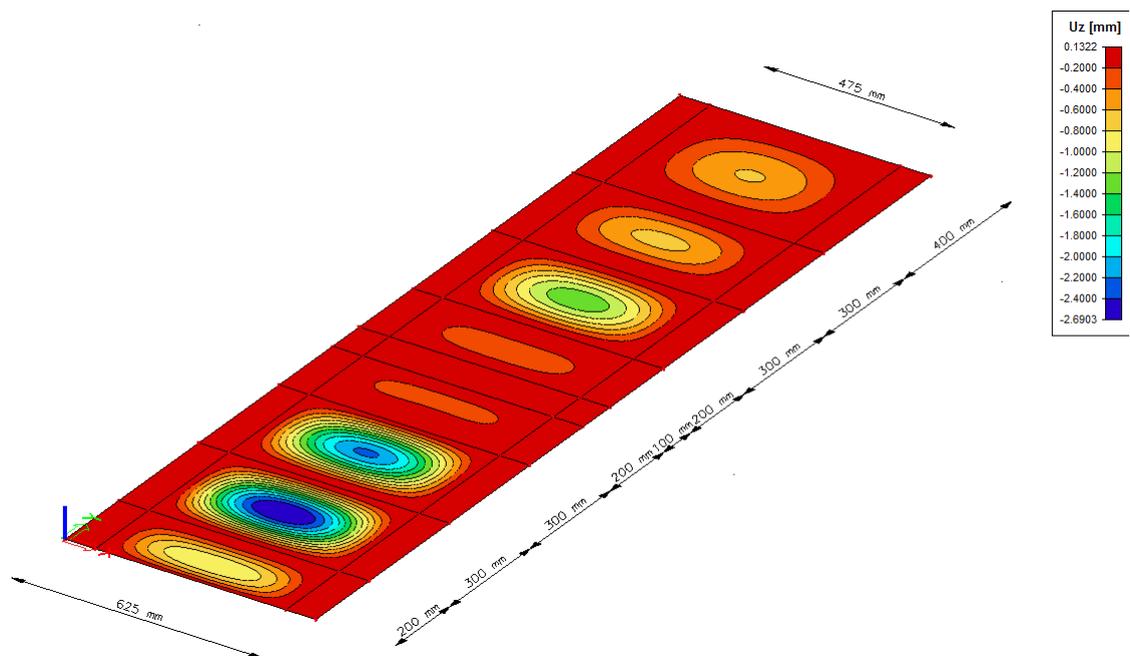
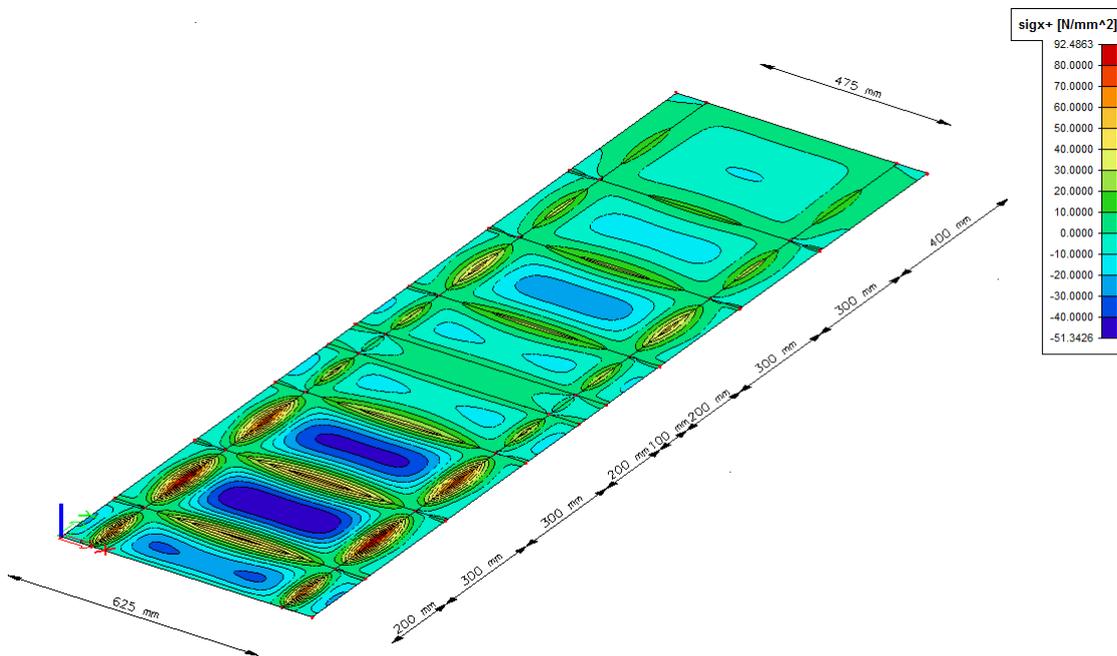
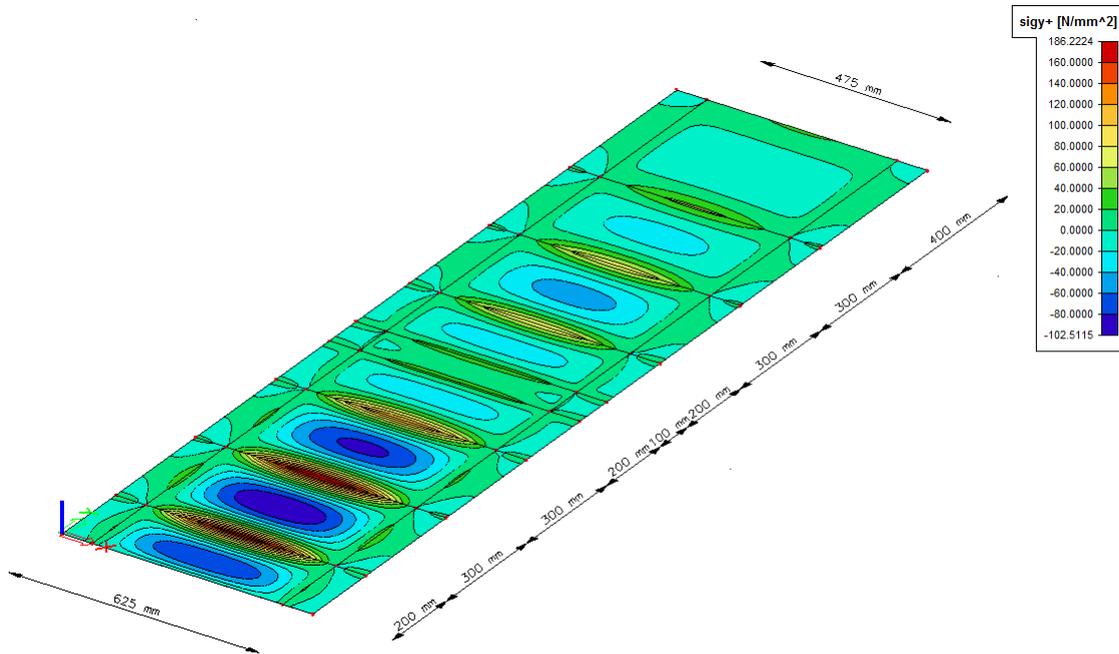


Abbildung 26: Verformung  $U_z$  für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen



(a) Grundspannung  $\sigma_x$  für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen



(b) Grundspannung  $\sigma_y$  für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen

Abbildung 27: Grundspannungen für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen

Abbildung 28 zeigt die Auflistung der Ergebnisse der FE-Rechnung und des *Bemessungstools* im Vergleich.

Teilplatte 1 oh. TS a = 400 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,64</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0555	-0,6640	0,7196	2,6088	16,7146	-10,8626	47,6118	-16,3242	24,8194
SCIA Engineer		0,0580	-0,6171	0,6751	3,1152	15,0706	-10,2008	44,3796	-15,7622	24,0253
Δ %		<b>4,42%</b>	<b>7,07%</b>	<b>6,18%</b>	<b>19,41%</b>	<b>9,84%</b>	<b>6,09%</b>	<b>6,79%</b>	<b>3,44%</b>	<b>3,20%</b>

Teilplatte 2 oh. TS a = 300 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,48</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0351	-0,7121	0,7472	-2,0495	28,2035	-14,4259	74,4593	-28,9860	47,6118
SCIA Engineer		0,0256	-0,6561	0,6817	-4,6726	25,4505	-13,3105	76,1089	-27,8389	44,3796
Δ %		<b>27,15%</b>	<b>7,86%</b>	<b>8,77%</b>	<b>127,98%</b>	<b>9,76%</b>	<b>7,73%</b>	<b>2,22%</b>	<b>3,96%</b>	<b>6,79%</b>

Teilplatte 3 oh. TS a = 300 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,48</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0543	-1,0998	1,1541	-3,0519	43,3434	-22,2507	76,1639	-44,6418	74,4593
SCIA Engineer		0,0730	-1,3428	1,4158	-3,7078	44,0425	-25,1813	80,0172	-49,0594	76,1089
Δ %		<b>34,53%</b>	<b>22,09%</b>	<b>22,68%</b>	<b>21,49%</b>	<b>1,61%</b>	<b>13,17%</b>	<b>5,06%</b>	<b>9,90%</b>	<b>2,22%</b>

Teilplatte 4 oh TS a = 200 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,32</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0032	-0,3115	0,3147	-10,5267	30,3883	-11,8609	35,2434	-27,0996	76,1639
SCIA Engineer		-0,0662	-0,3182	0,2520	-12,2089	30,4353	-12,3992	30,1203	-29,2570	80,0172
Δ %		<b>2156,45%</b>	<b>2,15%</b>	<b>19,93%</b>	<b>15,98%</b>	<b>0,15%</b>	<b>4,54%</b>	<b>14,54%</b>	<b>7,96%</b>	<b>5,06%</b>

Teilplatte 5 (TS) a = 100 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,16</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0000	-0,0214	0,0214	-3,9264	9,9331	4,3881	39,1859	14,6270	35,2434
SCIA Engineer		-0,0158	0,0642	0,0800	-2,7350	4,5721	-2,6235	28,0151	7,7530	30,1203
Δ %		<b>100,00%</b>	<b>399,93%</b>	<b>273,74%</b>	<b>30,34%</b>	<b>53,97%</b>	<b>159,79%</b>	<b>28,51%</b>	<b>47,00%</b>	<b>14,54%</b>

Teilplatte 6 uh. TS a = 200 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,32</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0038	-0,3681	0,3719	-12,4249	35,8892	-14,0126	119,1058	-32,6161	39,1859
SCIA Engineer		0,0000	-0,0265	0,0265	-15,5904	33,3958	-13,1911	118,1708	-30,4529	28,0151
Δ %		<b>100,00%</b>	<b>92,81%</b>	<b>92,89%</b>	<b>25,48%</b>	<b>6,95%</b>	<b>5,86%</b>	<b>0,79%</b>	<b>6,63%</b>	<b>28,51%</b>

Teilplatte 7 uh. TS a = 300 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,48</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0989	-2,0046	2,1035	-5,3906	78,6699	-40,5087	180,8298	-81,1720	119,1058
SCIA Engineer		0,1098	-2,2374	2,3472	-8,8454	77,1502	-42,8240	186,2224	-85,7478	118,1708
Δ %		<b>11,03%</b>	<b>11,61%</b>	<b>11,59%</b>	<b>64,09%</b>	<b>1,93%</b>	<b>5,72%</b>	<b>2,98%</b>	<b>5,64%</b>	<b>0,79%</b>

Teilplatte 8 uh. TS a = 300 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,48</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,1180	-2,3924	2,5104	-6,3929	93,8098	-48,3336	176,7425	-96,8278	180,8298
SCIA Engineer		0,1322	-2,6903	2,8225	-7,6207	92,4863	-51,3426	174,1942	-102,5115	186,2224
Δ %		<b>12,02%</b>	<b>12,45%</b>	<b>12,43%</b>	<b>19,21%</b>	<b>1,41%</b>	<b>6,23%</b>	<b>1,44%</b>	<b>5,87%</b>	<b>2,98%</b>

Teilplatte 9 uh. TS a = 200 mm		Wasserlast								
		Verformung [mm]			Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]					
<b>a/b = 0,32</b>		U <sub>Rand</sub>	U <sub>Feld</sub>	U <sub>Gesamt</sub>	σ <sub>x,Rand</sub>	σ <sub>x,Stütz</sub>	σ <sub>x,mitte</sub>	σ <sub>y,unten</sub>	σ <sub>y,mitte</sub>	σ <sub>y,oben</sub>
Bemessungstool		0,0133	-1,1697	1,1830	-18,4998	75,1899	-34,4778	0,0442	-84,8650	176,7425
SCIA Engineer		0,1017	-0,9975	1,0992	-22,4055	69,5080	-31,7410	0,2319	-79,4531	174,1942
Δ %		<b>663,17%</b>	<b>14,72%</b>	<b>7,08%</b>	<b>21,11%</b>	<b>7,56%</b>	<b>7,94%</b>	<b>424,32%</b>	<b>6,38%</b>	<b>1,44%</b>

Abbildung 28: Werte der Vergleichsrechnung für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen

### 3.3 Erkenntnisse aus den Vergleichsrechnungen

Folgende Erkenntnis konnte aus den Ergebnissen der Berechnungen mit den beiden unterschiedlichen Programmen gezogen werden. Betrachtet man die Vergleichsrechnungen der Einzelplatten, so wird klar ersichtlich, dass das Bemessungstool mit der FE-Berechnung nahezu exakt übereinstimmt.

Wie bereits erwähnt, kann die Berechnung der Einzelplatten übernommen werden, da die Abweichungen der Vergleichsrechnungen sehr gering waren. Es sei noch darauf hingewiesen, dass Platten mit einem Seitenverhältnis  $a/b < 0,2$  wie Platten mit einem  $a/b = 0,2$  behandelt werden. Diese Vereinfachung wurde getroffen, da sich die Verformungs- und Spannungsergebnisse bei  $a/b < 0,2$  im Vergleich zu den Ergebnissen bei  $a/b = 0,2$  kaum verändert haben. Weiters werden Platten mit einem Seitenverhältnis  $a/b > 4$  mit den gleichen Verformungen und Spannungen bestückt wie eine Platte mit  $a/b = 4$ . Da es bei den beabsichtigten Schlankheiten der Stauhaut kaum zu größeren  $a/b$ -Verhältnissen als vier kommen kann, ist auch diese Vereinfachung zulässig.

Bei den Vergleichsrechnungen der Plattenfolgen konnte Folgendes festgestellt werden. Schließt eine Teilplatte mit einem sehr großen  $a/b$ -Verhältnis an eine Teilplatte mit einem sehr kleinen  $a/b$ -Verhältnis an, so kommt es zu Spannungsumlagerungen hin zur kleineren Platte, da diese im Vergleich zu der angrenzenden, größeren Platte, eine höhere Steifigkeit aufweist. Das Bemessungstool berücksichtigt diesen Effekt mit Hilfe des Spannungsausgleichsverfahrens (Schmaußer, 1971). Hierbei werden jedoch nur die Spannungen in  $y$ -Richtung an den Plattenstößen mit den Steifigkeiten der angrenzenden Platten multipliziert, alle anderen Spannungs- und Verformungswerte bleiben unverändert. Das Verfahren wird im Abschnitt *Berechnungsablauf* noch genauer erklärt.

Die großen Abweichungen zwischen den berechneten Verformungen und Spannungen der Plattenfolge ohne horizontale Rippen als auch der Plattenfolge mit horizontalen Rippen im Bereich der Trittstufe lassen sich wie folgt erklären. Schneidet man einen 1 cm breiten Streifen in der Längsrichtung der Stauhaut heraus und betrachtet man den Durchlaufträger belastet mit einer konstanten Gleichlast, wobei die beiden angrenzenden Felder im Vergleich zu dem Feld in der Mitte sehr groß sind, dann nehmen die beiden Randfelder sehr großen Einfluss auf die Durchbiegung bzw. den Spannungsverlauf des Feldes in der Mitte. Die eigentliche Belastung des Mittelfeldes spielt nur noch eine untergeordnete Rolle, die Verformung und somit auch alle weiteren Schnittkräfte, werden von den angrenzenden Feldern so stark beeinträchtigt, dass sich das Vorzeichen der Verformung ändert und es zu einer Durchbiegung der Platte in die entgegengesetzte Richtung kommt. Abbildung 29 soll diese Änderung des Vorzeichens der Verformung anhand eines Durchlaufträgers mit drei Feldern, was einer Stauhaut mit Trittstufe ohne horizontalen Rippen entspricht, deutlich machen. Dieser Effekt wird umso ausgeprägter desto unterschiedlicher die Längen und somit auch die Steifigkeiten der angrenzenden Platten sind.

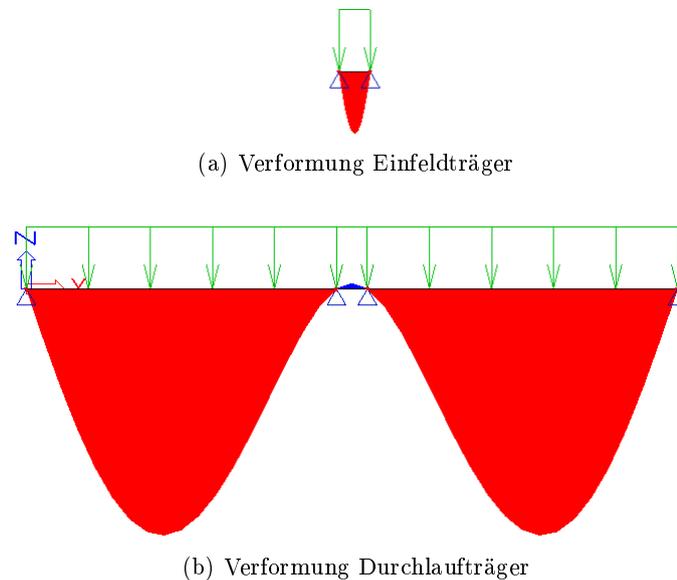


Abbildung 29: Verformungsvergleich Durchlaufträger mit kurzem Mittelfeld und Einfeldträger (überhöht dargestellt)

Weiters konnte festgestellt werden, dass bis zu einem Verhältnis der Plattenseiten  $a$  und  $b$  kleiner als zwei, in der Regel die Spannungen in  $y$ -Richtung maßgebend für die Bemessung sind. Hat man es jedoch mit einer langen Einzelplatte zu tun, sprich ab einem  $a/b$ -Verhältnis von größer als zwei, dann trägt die Platte den Hauptanteil der Spannungen über die kurze Seite ab und die Spannungen in  $x$ -Richtung werden für die Bemessung relevant.

Als letzter Punkt ist noch zu erwähnen, dass eine nicht belastete Teilplatte nach der FE-Rechnung trotzdem Spannungen und Verformungen aufgrund der angrenzenden Teilplatten aufgezwungen werden. Dieser Effekt lässt sich mit dem Bemessungsprogramm nicht modellieren. Einzig und allein werden erneut die Spannungen in  $y$ -Richtung mit dem Spannungsausgleichsverfahren an den Plattenstößen angepasst. Für alle anderen Spannungen und Verformungswerte liefert das *Bemessungstool* den Wert null. Da dieses Problem aber nur am Beckenkopf auftritt und es sich stets um sehr kleine Verformungen und geringe Spannungen handelt, kann diese Ungenauigkeit der Berechnung in Kauf genommen werden.

Es sei noch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle großen Differenzen der beiden Berechnungen im Bereich der Trittstufe niemals bemessungsrelevant sind und somit auch auf die Berechnung der angrenzenden Platten keinen Einfluss haben und vernachlässigt werden können. Die bemessungsrelevante Spannung der Trittstufe wurde mit Hilfe der Einhängeparabel modifiziert und liefert Ergebnisse, die auch für die Bemessung akzeptabel sind. Die bemessungsrelevanten Werte aller anderen Einzelplatten weisen stets sehr kleine Differenzen der Ergebnisse der beiden Berechnungen auf.

## 4 Überlaufrinne

Aufgrund der komplexen Geometrie wurde für die Überlaufrinne ebenfalls eine FE-Rechnung im Rahmen einer Vorstudie durchgeführt. Die Abbildung links zeigt das FE-Modell der Überlaufrinne mit einer Gesamttiefe von 350 mm und einer Dicke von nur 1,5 mm bei einer Rinnengesamtlänge von 1000 mm bzw. 1500 mm. Da die Rinne mit einer Gesamttiefe von 350 mm für lokales Beulen am stärksten gefährdet ist, wurde diese für die Berechnung herangezogen. Bei größeren Tiefen der Rinne ist eine zweite Sicke am selben Element anzuordnen.

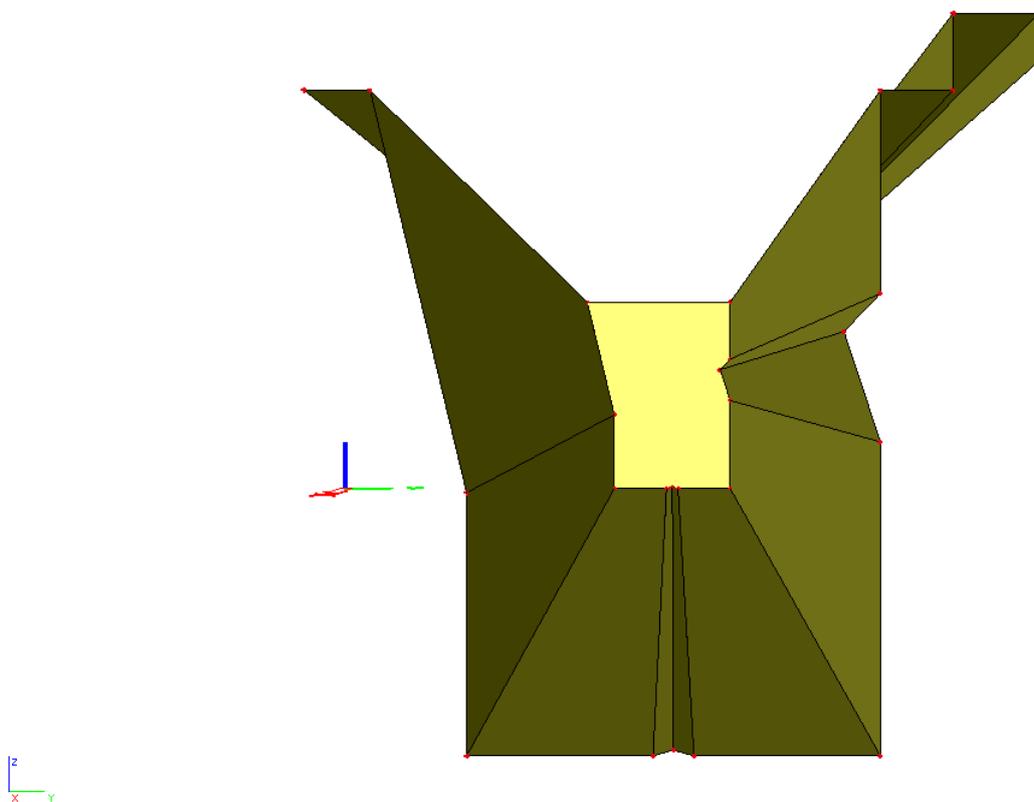
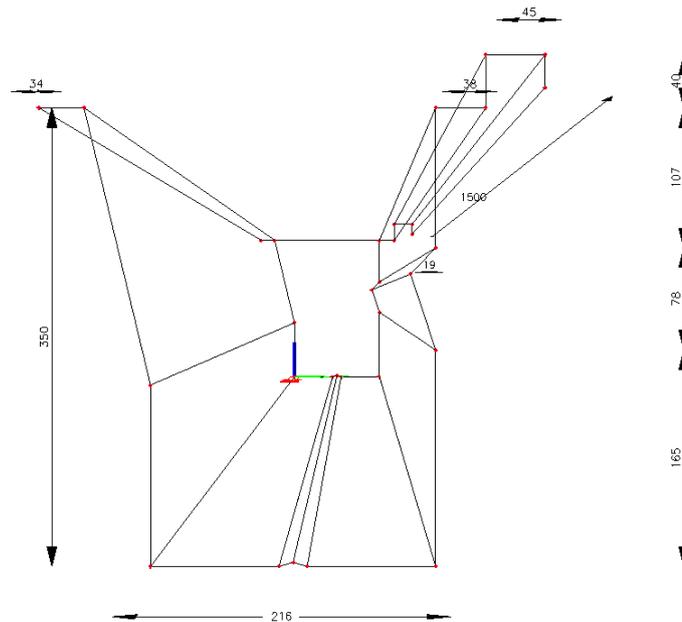


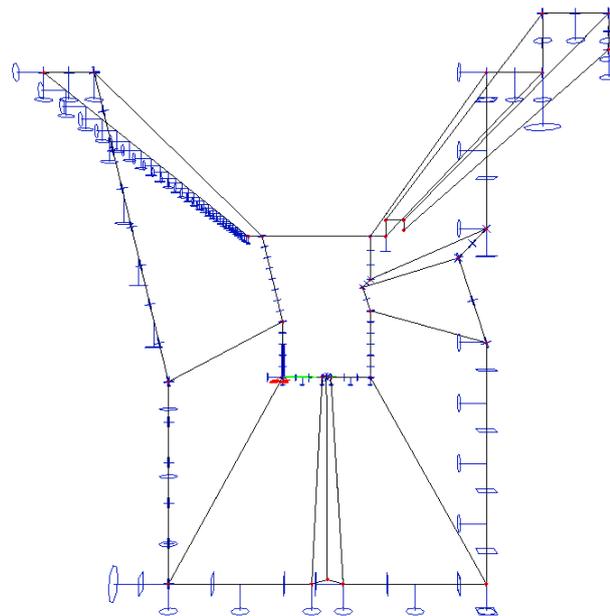
Abbildung 30: FE-Modell Überlaufrinne

## 4.1 Geometrie und Auflagerbedingungen

Die Abbildung 31a zeigt die Überlaufrinne mit ihren Abmessungen und die Abbildung 31b stellt die gewählten Auflagerbedingungen für die FE-Modellierung dar.



(a) Geometrie Überlaufrinne (Maße in mm)



(b) Lagerbedingungen Überlaufrinne

Abbildung 31: Randbedingungen Überlaufrinne

Um die Überlaufrinne möglichst realitätsnah zu modellieren, wurde am Ende der Rinne ein Schott eingefügt. Dies entspricht einer gelenkig gelagerten Platte und soll dem Ende der Überlaufrinne entsprechen. Die Lagerung am vorderen Ende der Längsachse der Rinne wurde mit einer Symmetrieebene angenommen, d.h., sie entspricht der Stoßebeene zweier Rinnenelemente.

## 4.2 Material

Erneut wurde das Material 1.4404 mit folgenden Kennwerten für die Berechnung verwendet:

- Fließgrenze:  $240 \text{ N/mm}^2$
- Zugfestigkeit:  $530 \text{ N/mm}^2$
- E-Modul:  $200.000 \text{ N/mm}^2$
- G-Modul:  $76.923 \text{ N/mm}^2$
- Querdehnungszahl:  $\nu = 0,3$

## 4.3 Belastung

Für die Modellierung der Überlaufrinne wurden folgende charakteristischen Lasten angenommen:

- Wasserdruck in einer Tiefe von  $T = 350 \text{ mm}$  ( $3,5 \text{ KN/m}^2$ )
- Aktiver Erddruck mit  $\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$ ,  $\varphi = 30^\circ$  und  $K_a = 0,33$
- Verkehrslast Flächenlast:  $p = 5,0 \text{ KN/m}^2$
- Verkehrslast Rinnenkopf:  $p = 1,08 \text{ KN/m}$  ( $5,0 \cdot 0,216 = 1,08 \text{ KN/m}$ )

Die Abbildungen 32 und 33 zeigen die Lastbilder wie sie in der FE-Rechnung modelliert wurden.

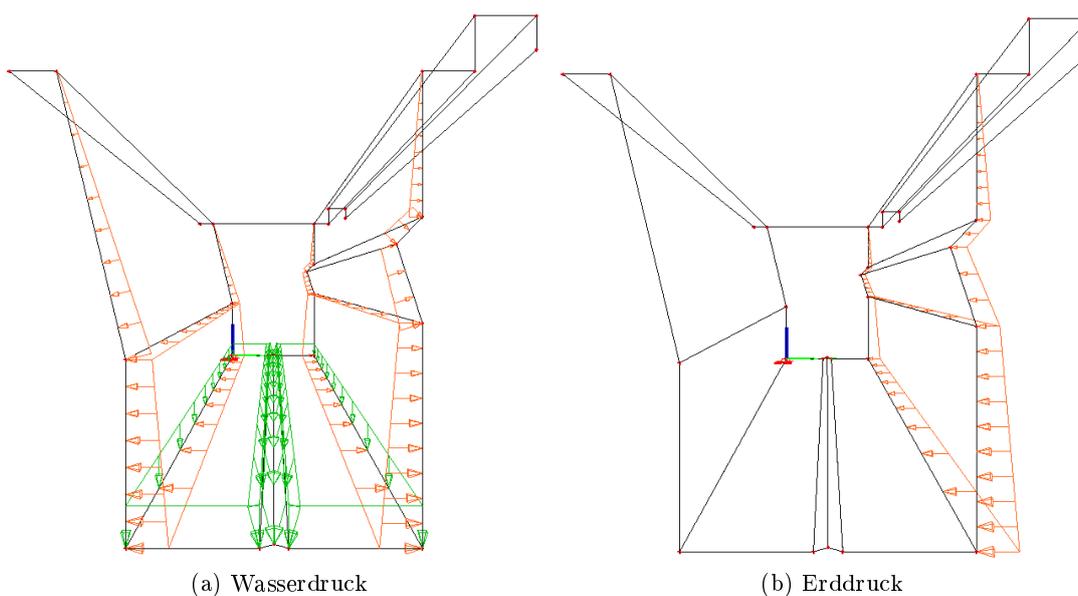


Abbildung 32: Lasten für die Überlaufrinne I

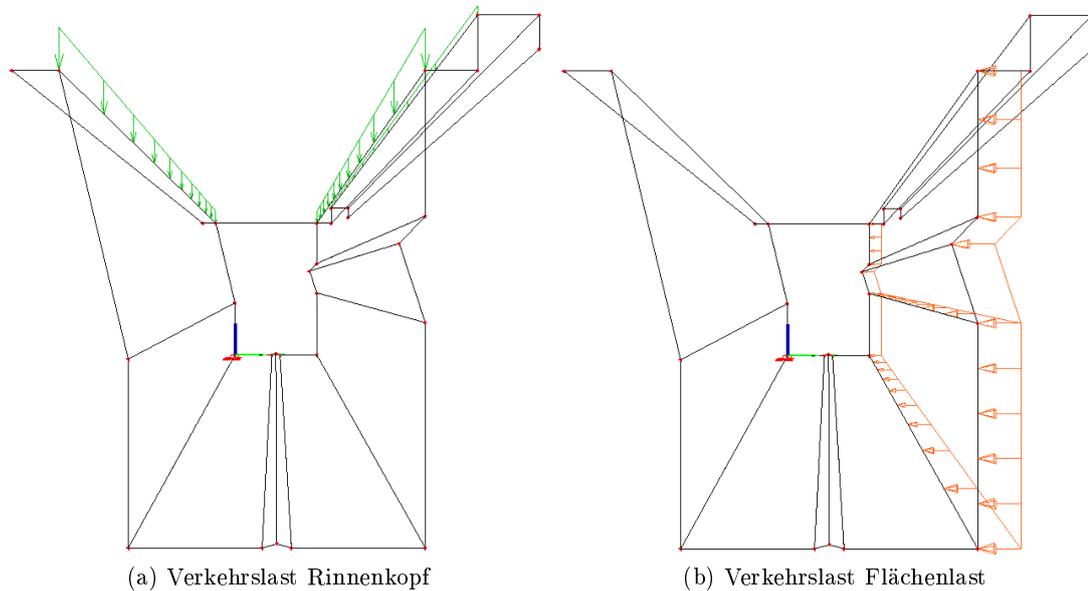


Abbildung 33: Lasten für die Überlaufrinne II

Diese Lasten wurden miteinander kombiniert. Die Größen der einzelnen Belastungen wurden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit<sup>7</sup> und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit<sup>8</sup> noch mit den  $\gamma \cdot \psi$ -Werten multipliziert, welche sich in den folgenden Tabellen entnehmen lassen. Die Einwirkungen auf die Überlaufrinne sind:

	Wasser	akt. Erddruck	Verkehrslast Rinnenkopf	Flächenlast
LFK 1	1,20	-	-	-
LFK 2	1,20	-	1,05	-
LFK 3	-	1,35	1,50	1,05
LFK 4	-	1,35	1,05	1,50

Tabelle 2: Lastfallkombinationen Rinne ULS

Die ersten beiden Lastfallkombinationen entsprechen der Belastung der Überlaufrinne beim Bautyp Hallenbad. Für den Bautyp Freibad wurden die Lastfallkombinationen 3 und 4 untersucht. Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergaben sich folgende maßgebende Lastfallkombinationen.

	Wasser	akt. Erddruck	Verkehrslast Rinnenkopf	Flächenlast
LFK 5	1,00	-	0,70	-
LFK 6	-	1,00	1,00	0,70
LFK 7	-	1,00	0,70	1,00

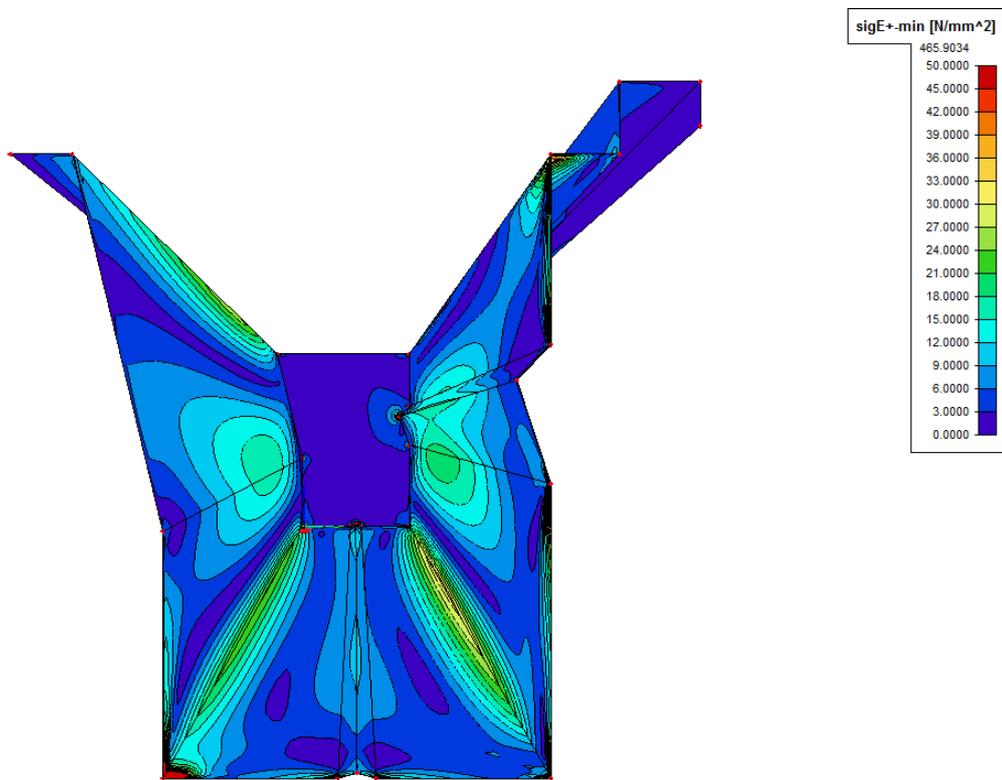
Tabelle 3: Lastfallkombinationen Rinne SLS

<sup>7</sup>kurz ULS

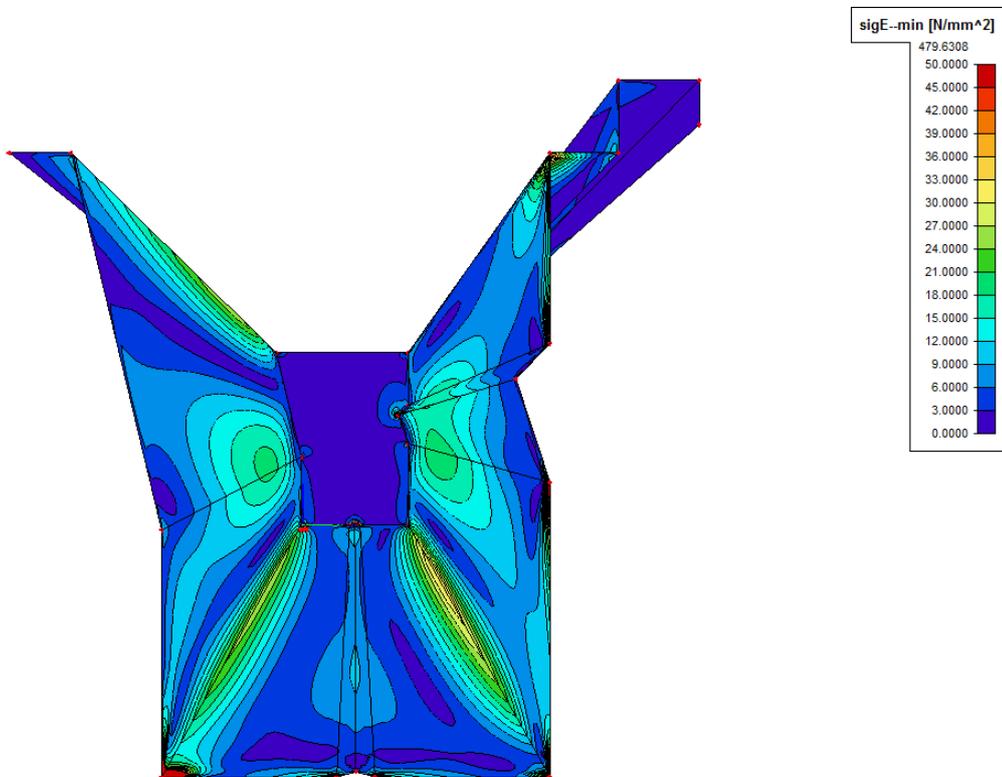
<sup>8</sup>kurz SLS

#### 4.4 Ergebnisse

Es wurden zwei Rinnen mit unterschiedlichen Längen untersucht. Die erste Rinne beläuft sich auf 1000 mm und die zweite auf 1500 mm zwischen den Rinnenabstützungen (Rinnenkörben). Die folgenden Abbildungen zeigen die graphischen Ergebnisse der FE-Berechnung für alle Lastfallkombinationen mit einer Rinnenlänge von 1500 mm. Es werden die Hauptvergleichsspannungen an der Platteninnen- und Außenseite  $\sigma_{E+}$  und  $\sigma_{E-}$ , die Normalkräfte (Membrankräfte)  $n_x$ ,  $n_y$  und die Momente  $m_x$  und  $m_y$  für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ausgewiesen.

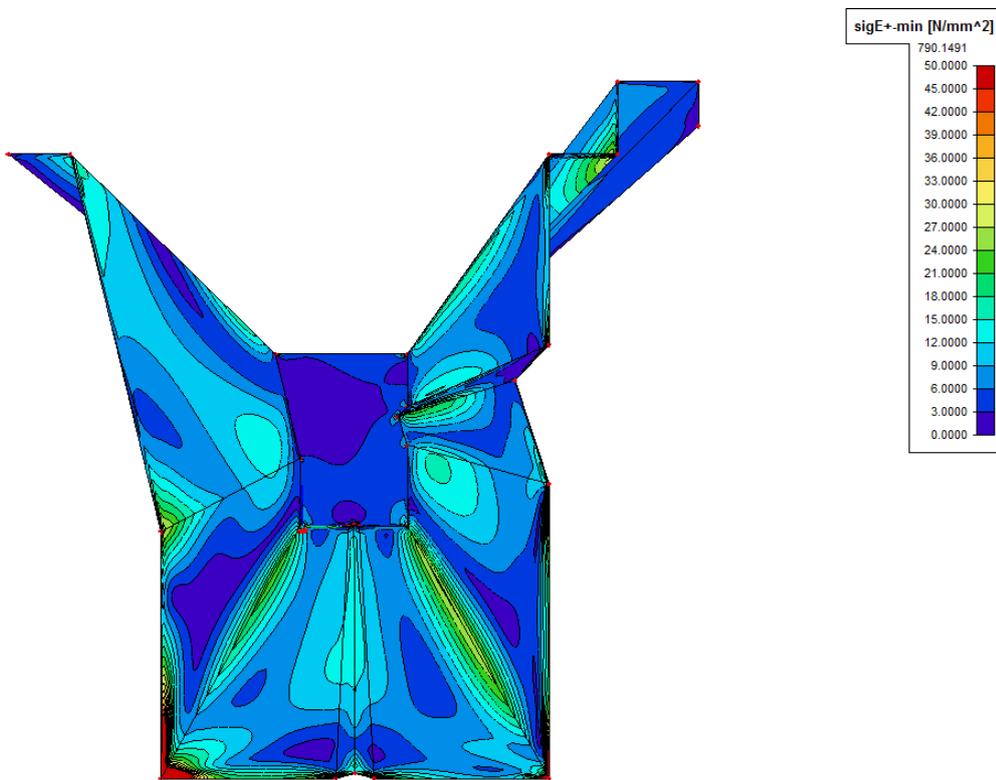


(a) Vergleichsspannung  $\sigma_{E+}$  aufgrund von LFK 1

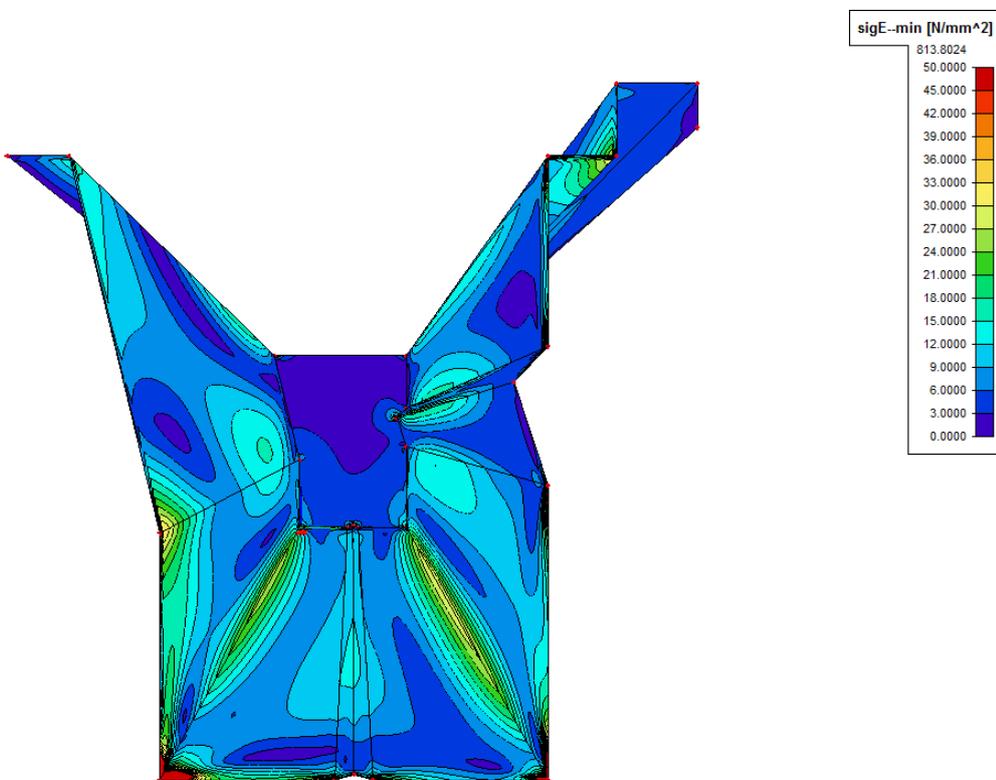


(b) Vergleichsspannung  $\sigma_{E-}$  aufgrund von LFK 1

Abbildung 34: Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 1

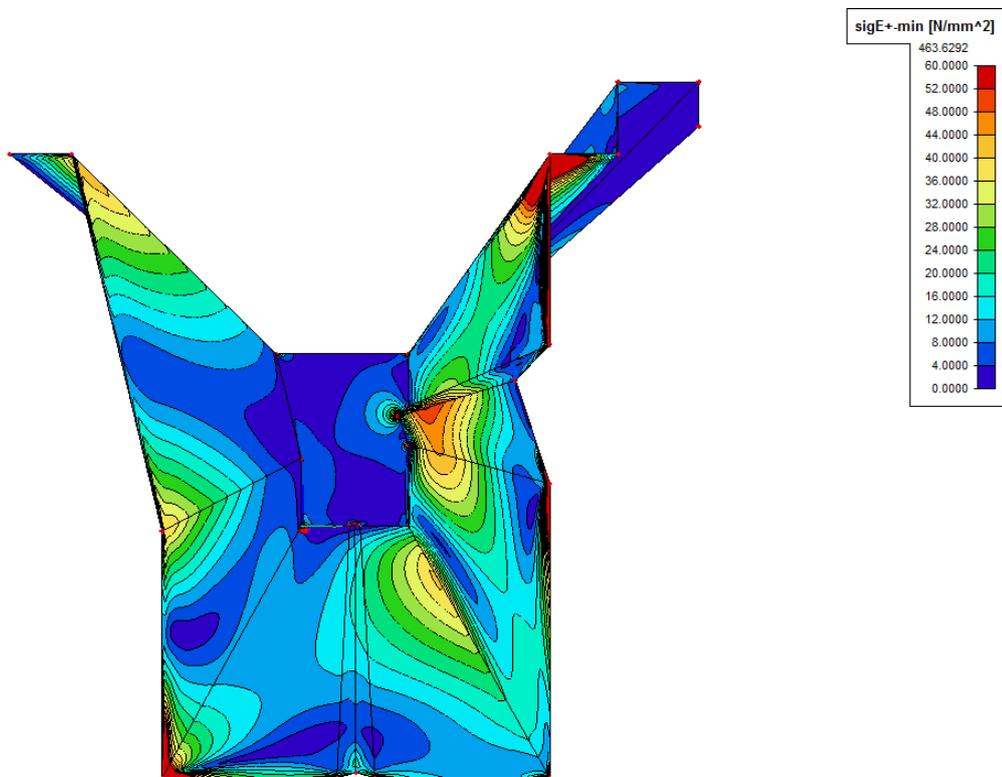


(a) Vergleichsspannung  $\sigma_{E+}$  aufgrund von LFK 2

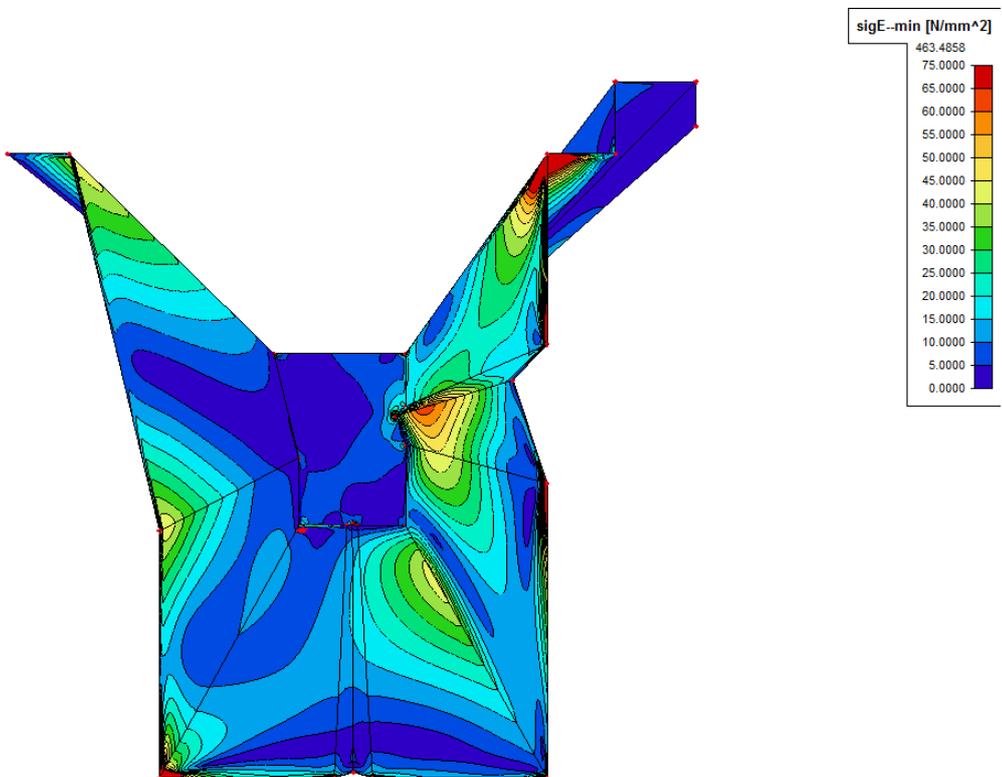


(b) Vergleichsspannung  $\sigma_{E-}$  aufgrund von LFK 2

Abbildung 35: Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 2

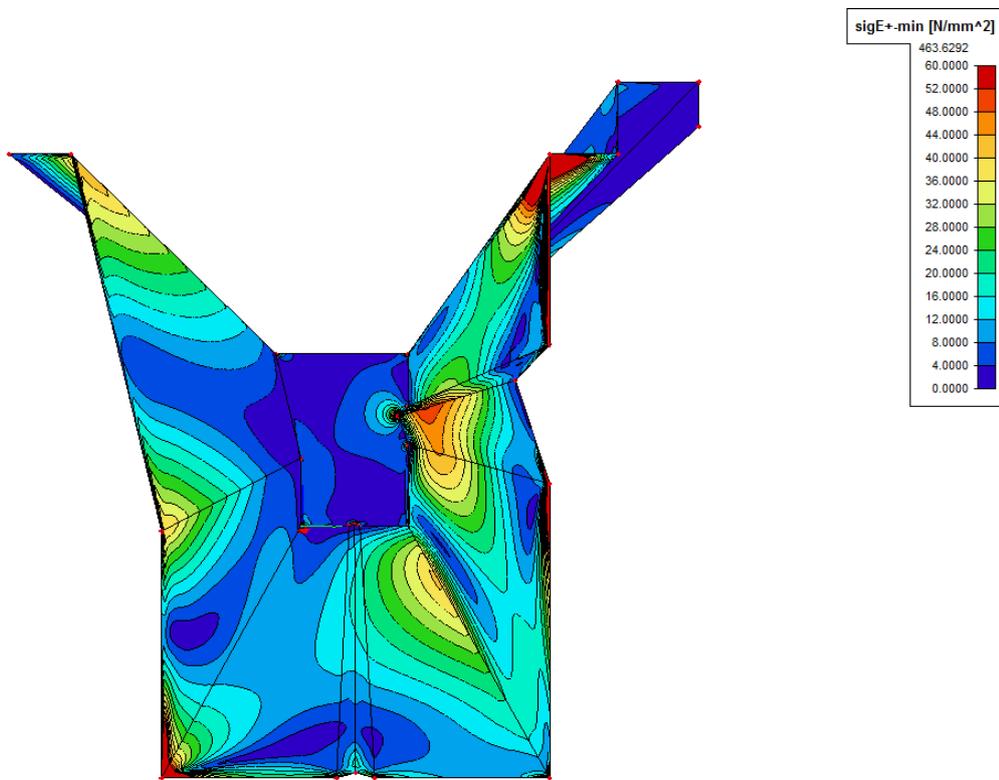


(a) Vergleichsspannung  $\sigma_{E+}$  aufgrund von LFK 3

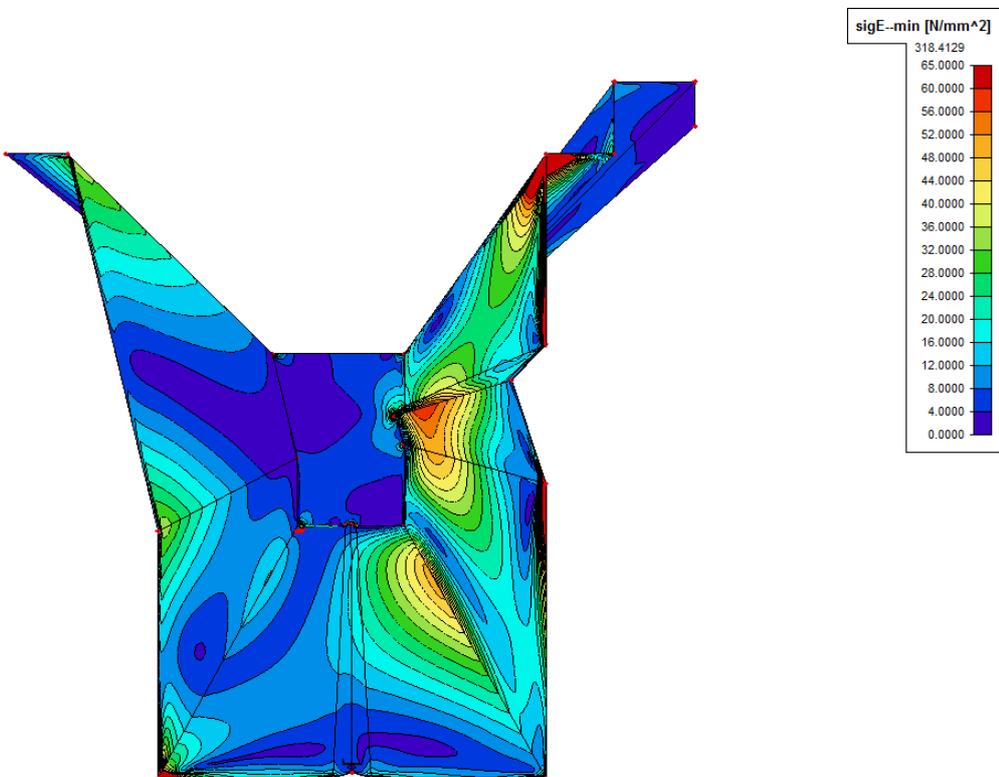


(b) Vergleichsspannung  $\sigma_{E-}$  aufgrund von LFK 3

Abbildung 36: Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 3

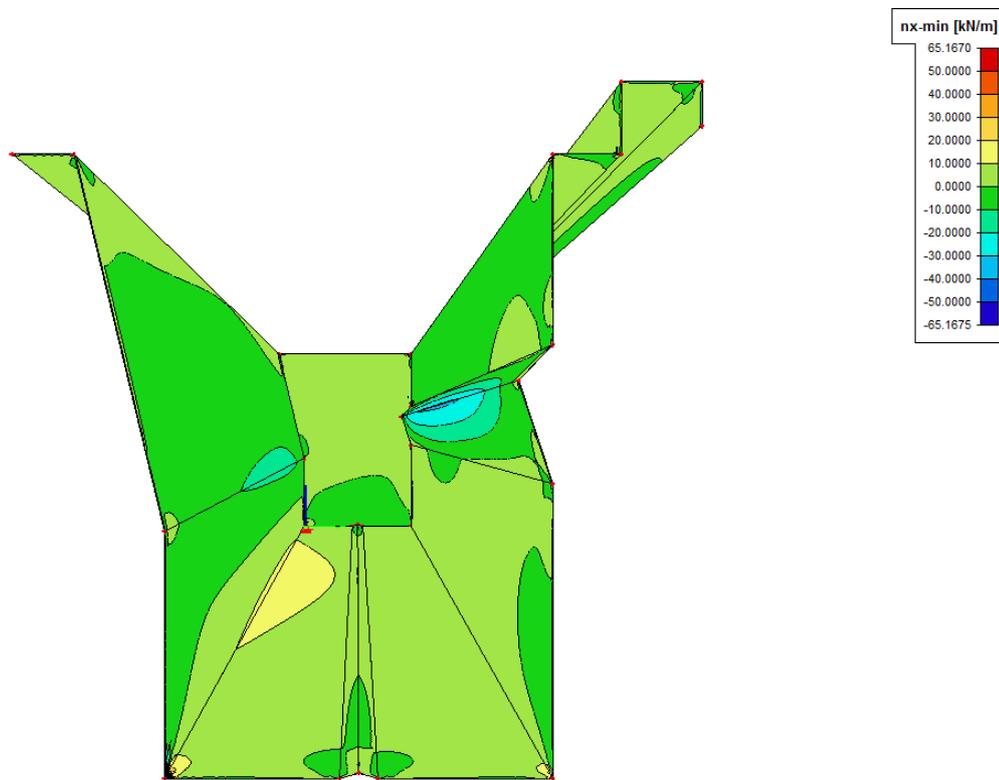


(a) Vergleichsspannung  $\sigma_{E+}$  aufgrund von LFK 4

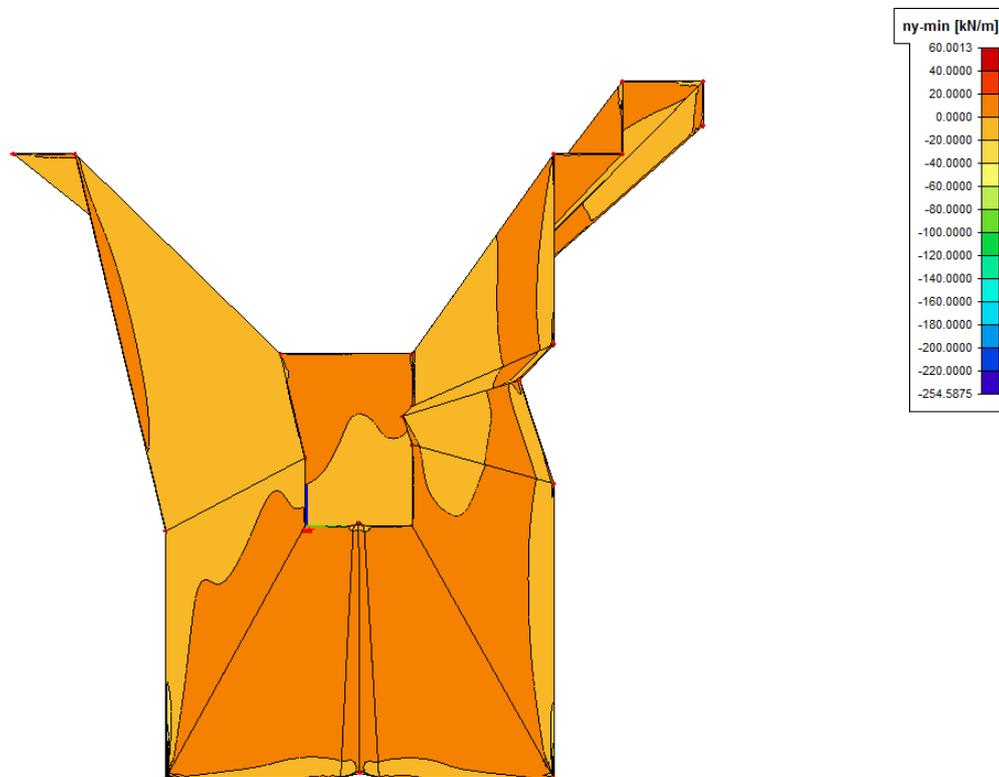


(b) Vergleichsspannung  $\sigma_{E-}$  aufgrund von LFK 4

Abbildung 37: Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 4

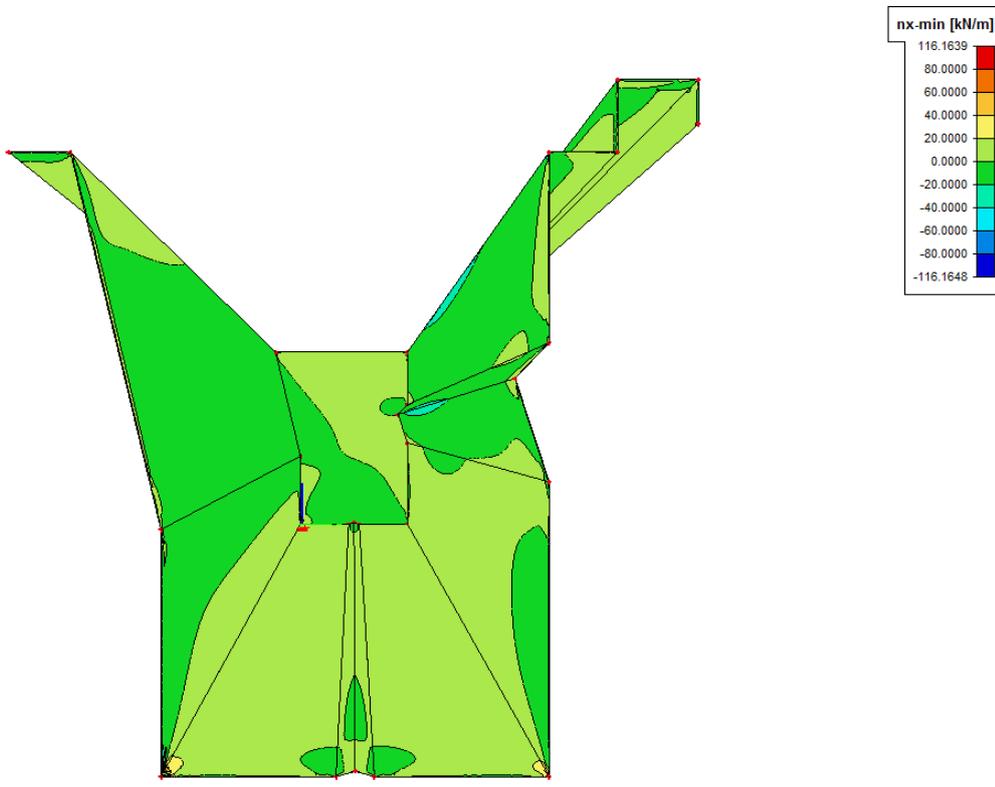


(a) Normalkraft  $n_x$  aufgrund von LFK 1

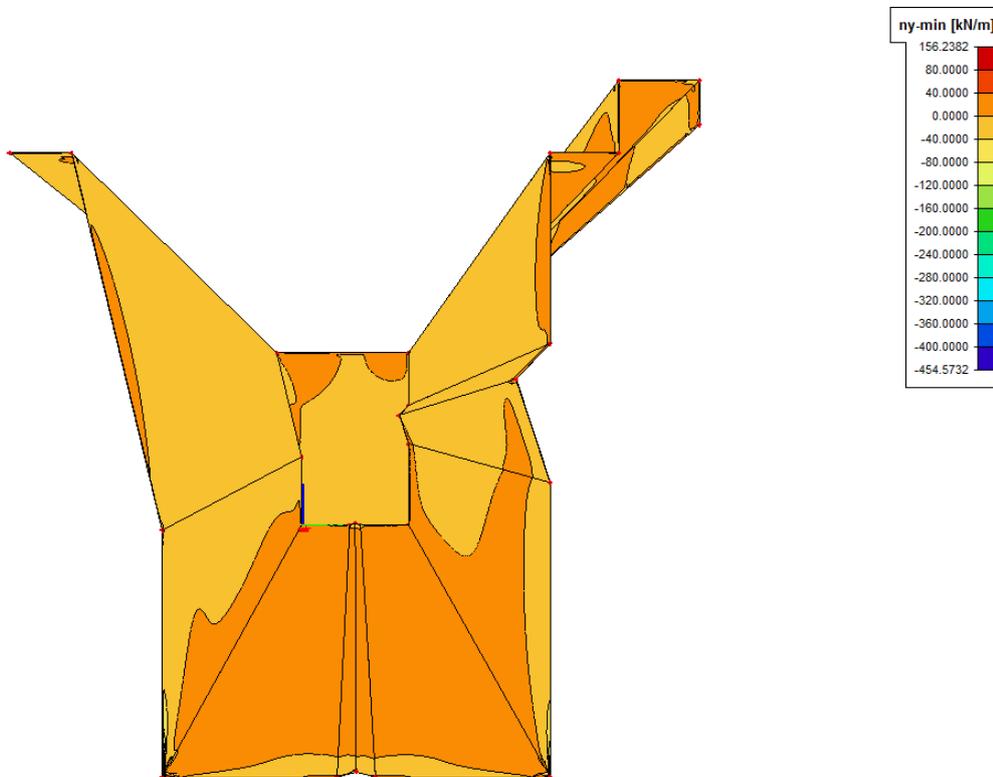


(b) Normalkraft  $n_y$  aufgrund von LFK 1

Abbildung 38: Normalkräfte  $n$  aufgrund von ULS LFK 1

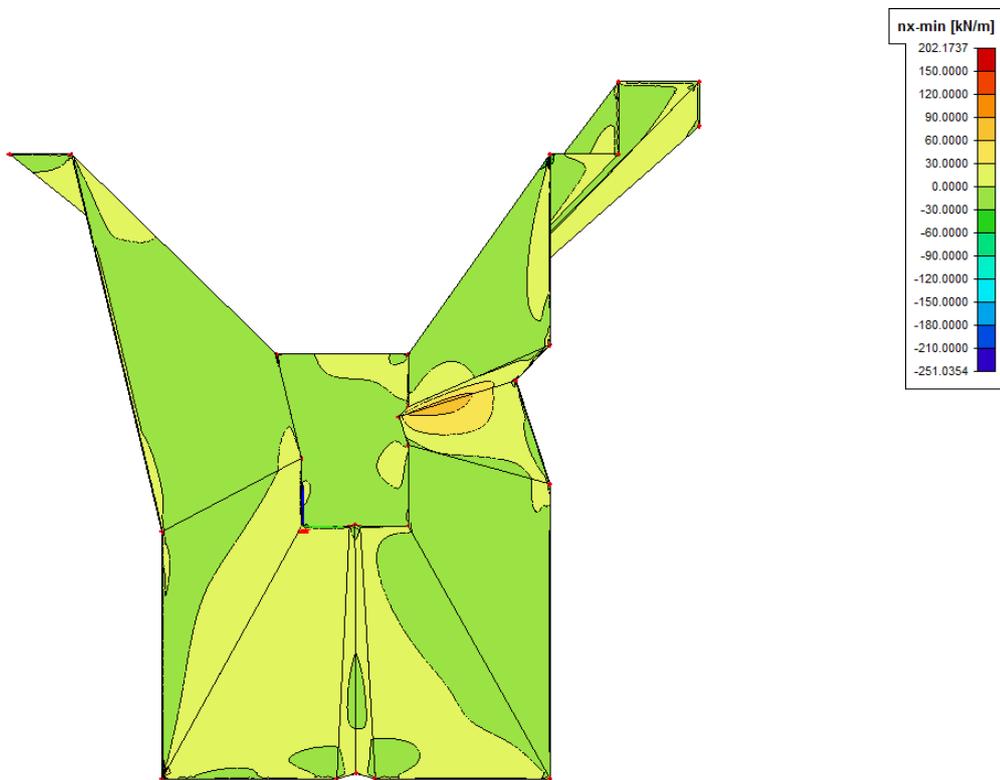


(a) Normalkraft  $n_x$  aufgrund von LFK 2

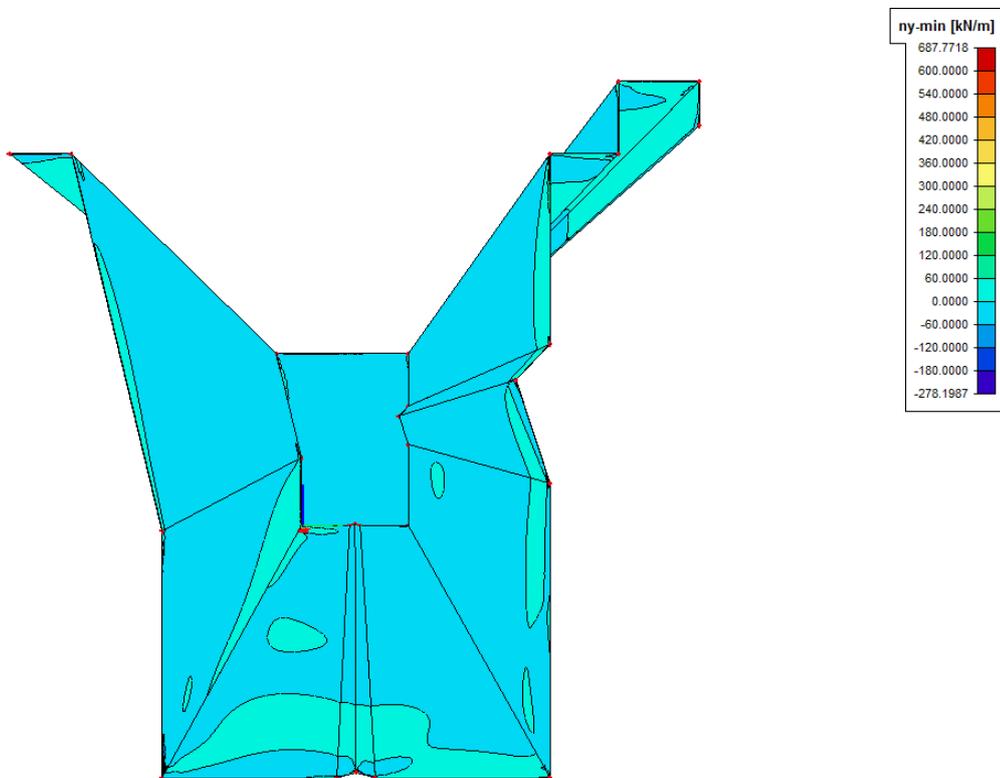


(b) Normalkraft  $n_y$  aufgrund von LFK 2

Abbildung 39: Normalkräfte  $n$  aufgrund von ULS LFK 2

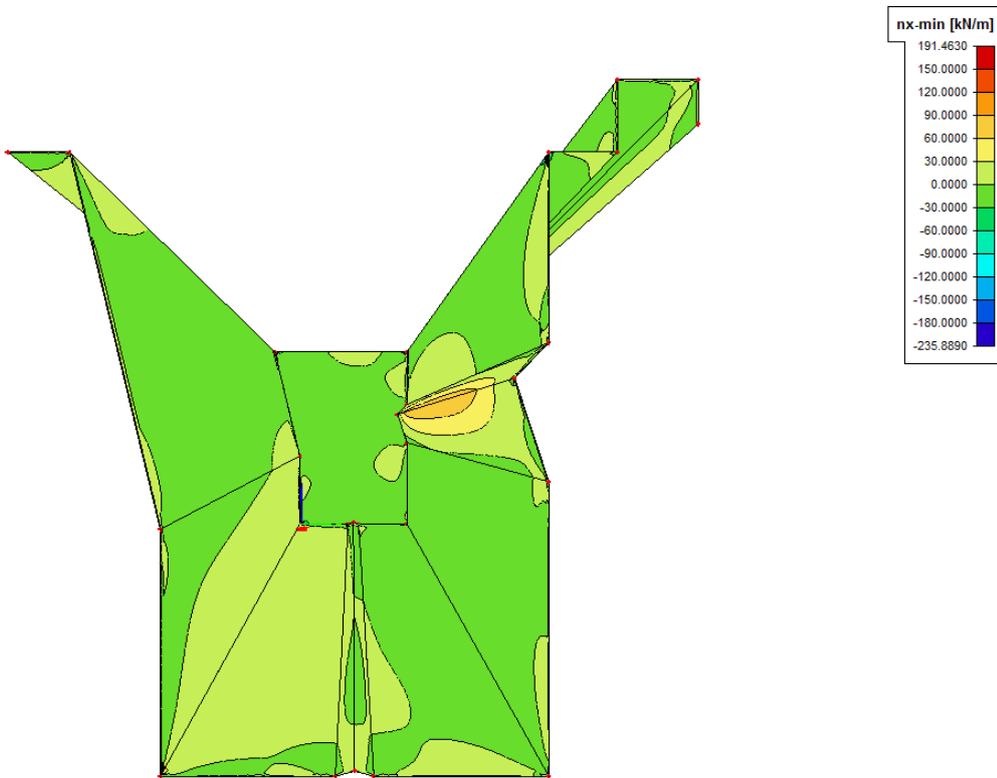


(a) Normalkraft  $n_x$  aufgrund von LFK 3

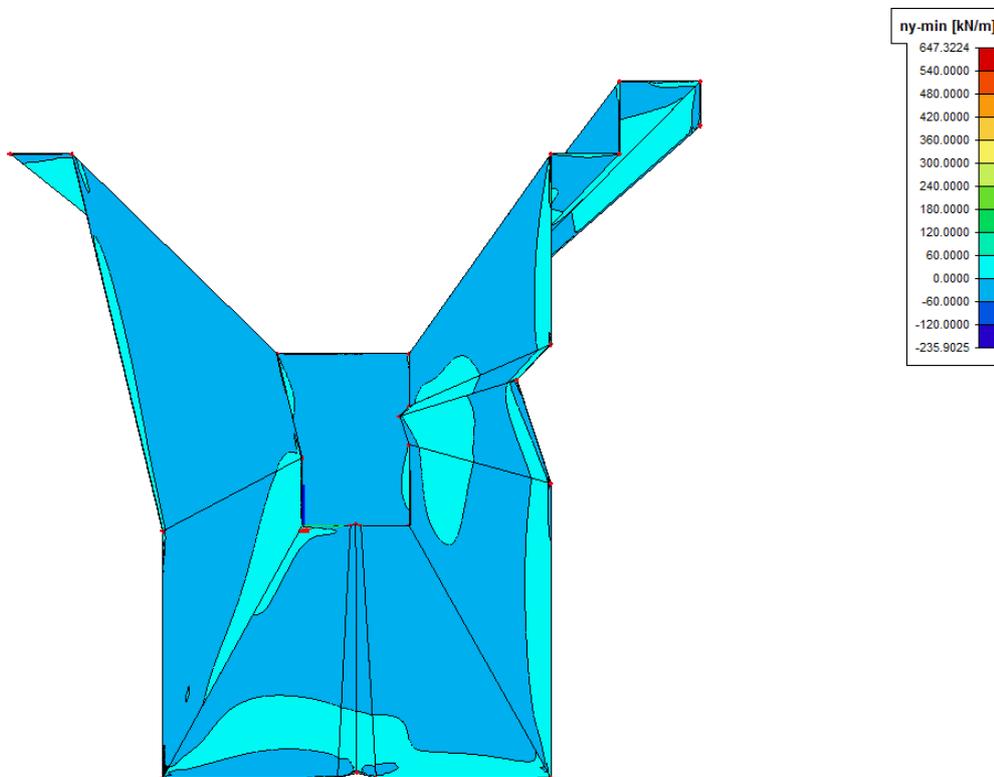


(b) Normalkraft  $n_y$  aufgrund von LFK 3

Abbildung 40: Normalkräfte  $n$  aufgrund von ULS LFK 3

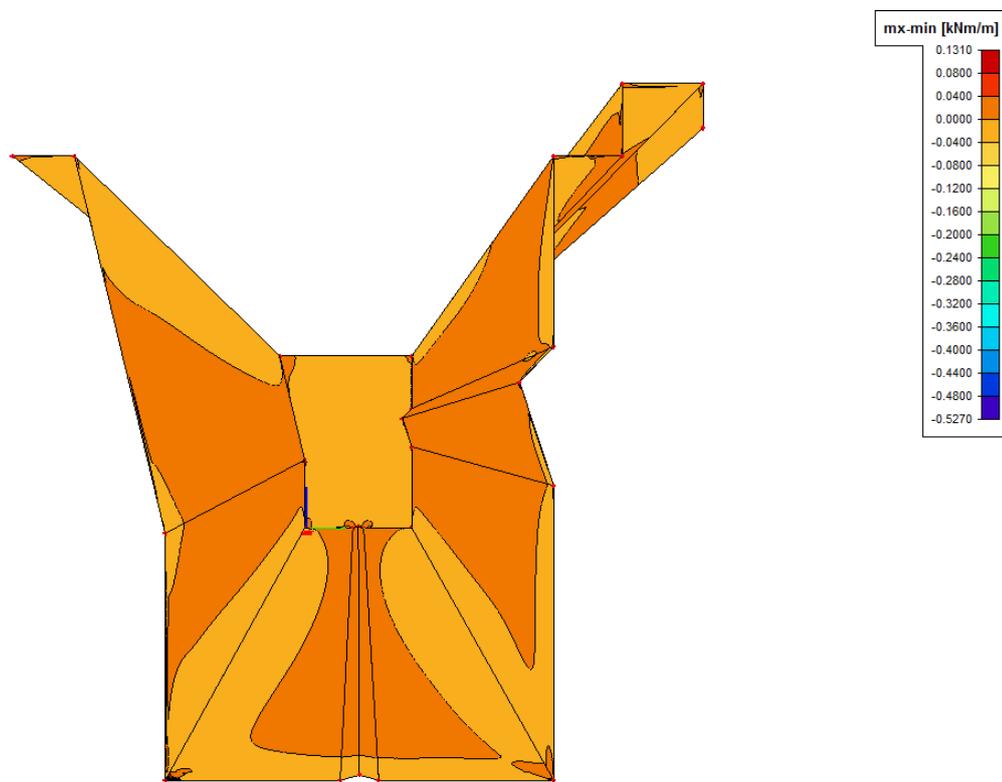


(a) Normalkraft  $n_x$  aufgrund von LFK 4

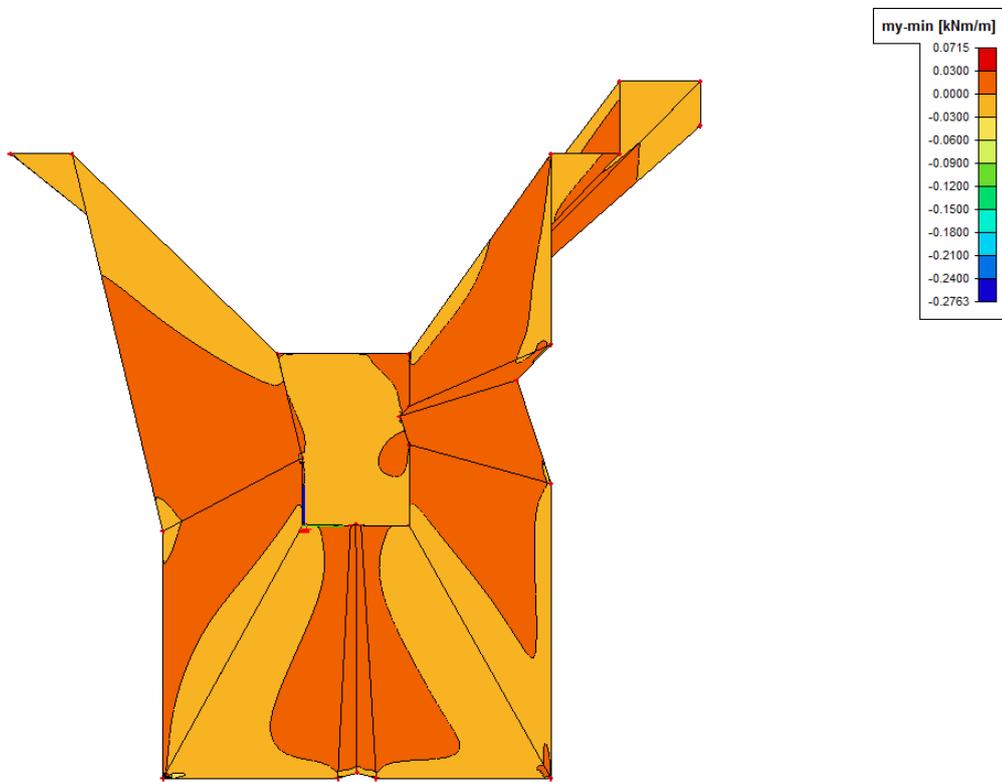


(b) Normalkraft  $n_y$  aufgrund von LFK 4

Abbildung 41: Normalkräfte  $n$  aufgrund von ULS LFK 4

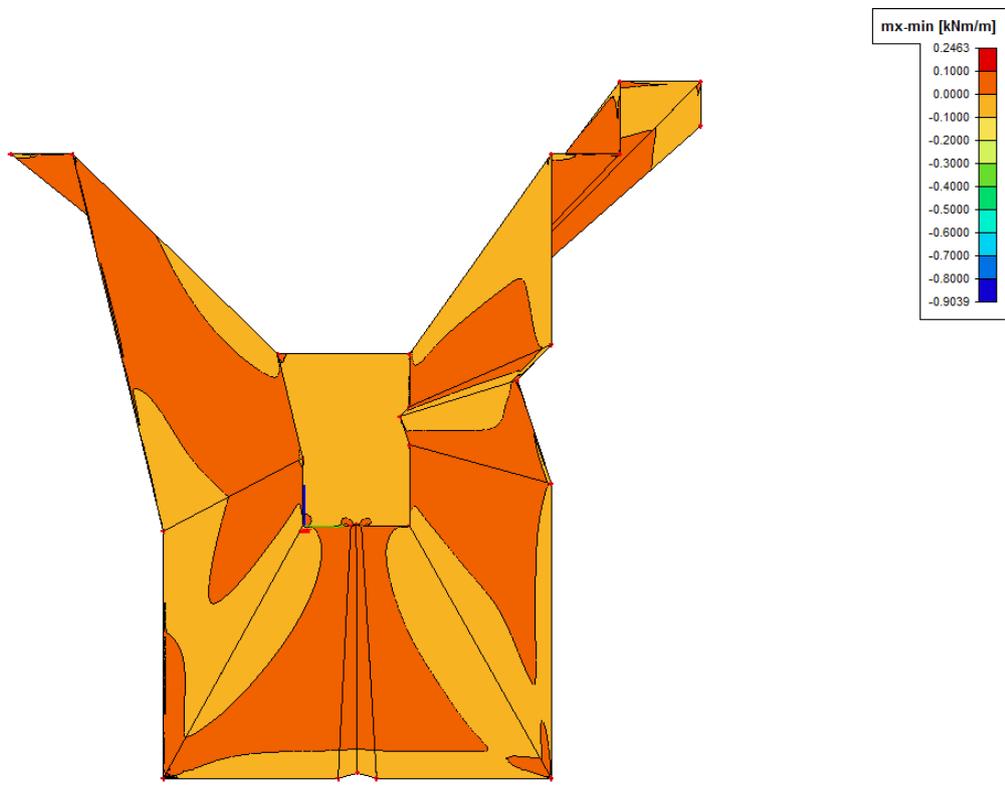


(a) Moment  $m_x$  aufgrund von LFK 1

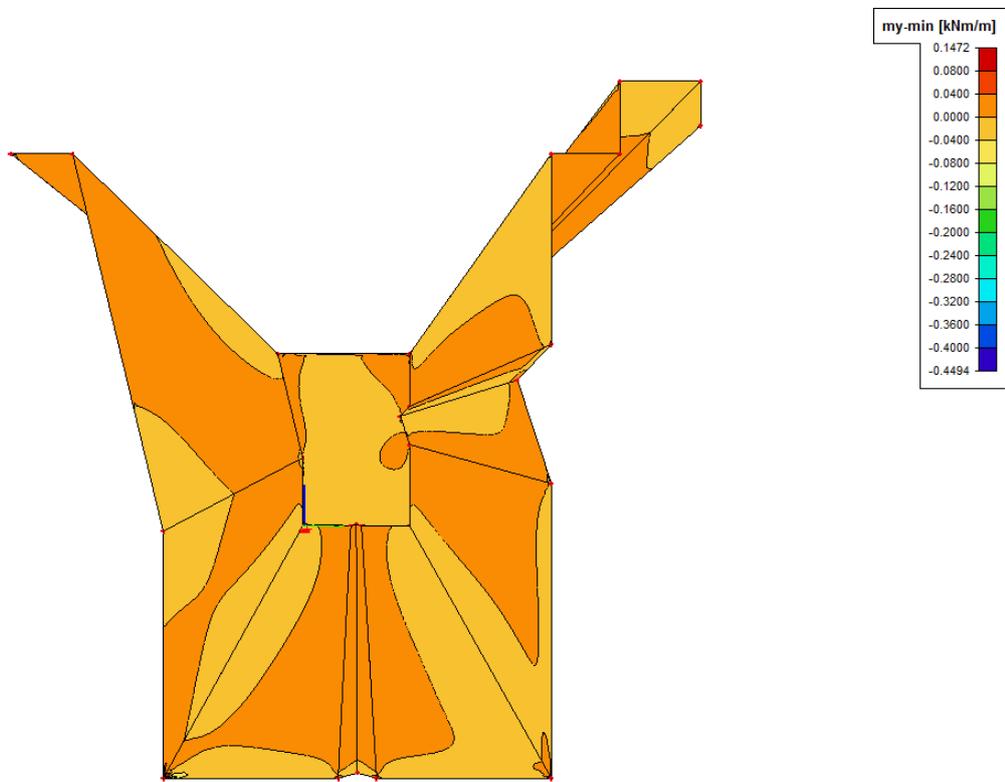


(b) Moment  $m_y$  aufgrund von LFK 1

Abbildung 42: Momente  $m$  aufgrund von ULS LFK 1

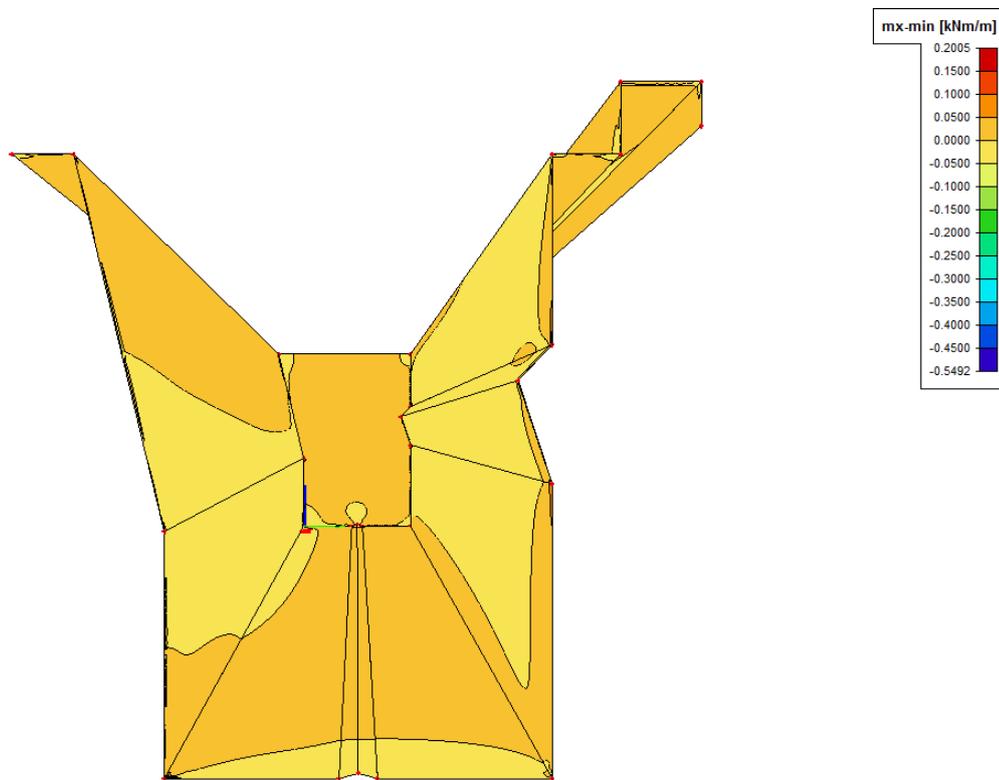


(a) Moment  $m_x$  aufgrund von LFK 2

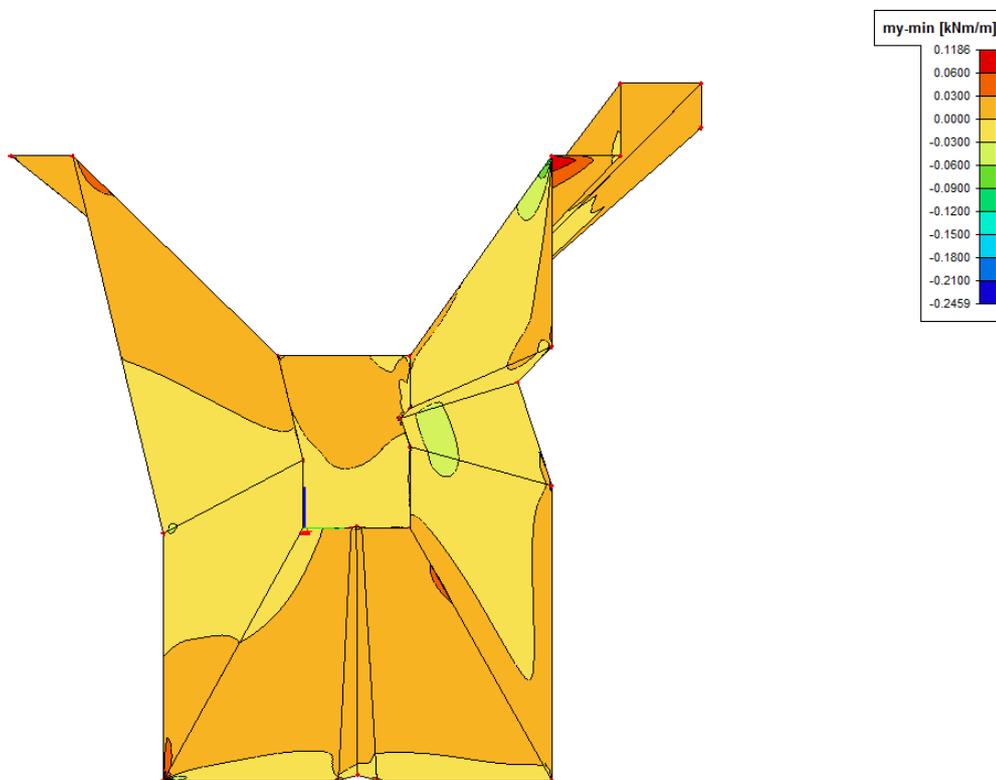


(b) Moment  $m_y$  aufgrund von LFK 2

Abbildung 43: Momente  $m$  aufgrund von ULS LFK 2

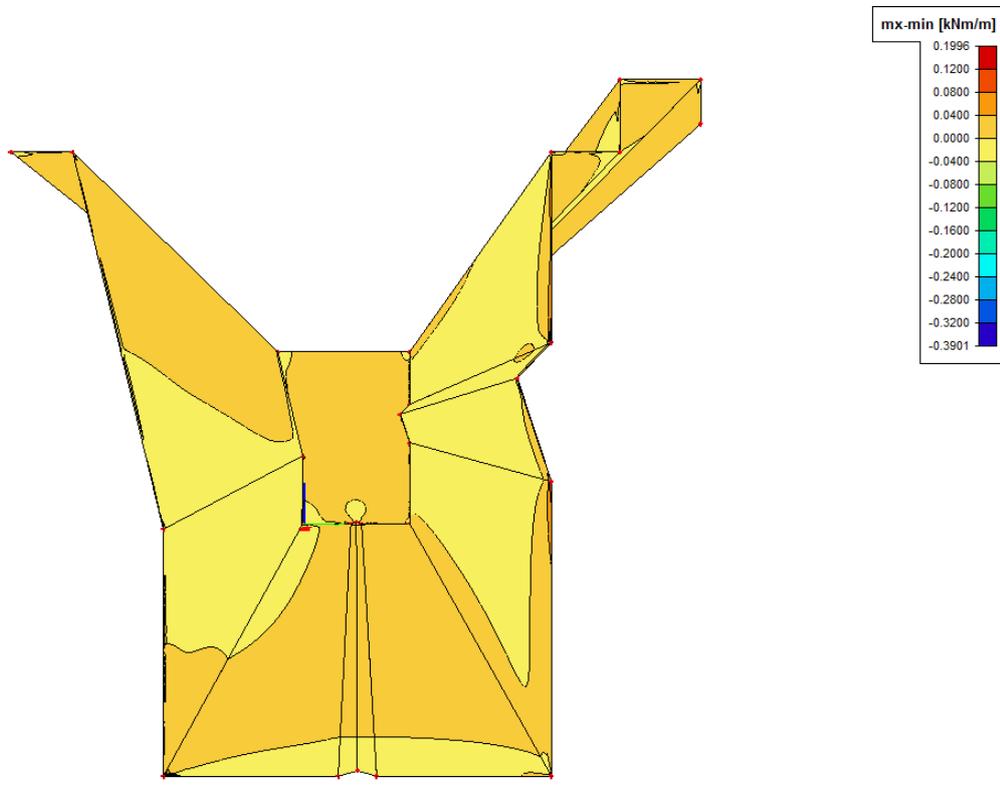


(a) Moment  $m_x$  aufgrund von LFK 3

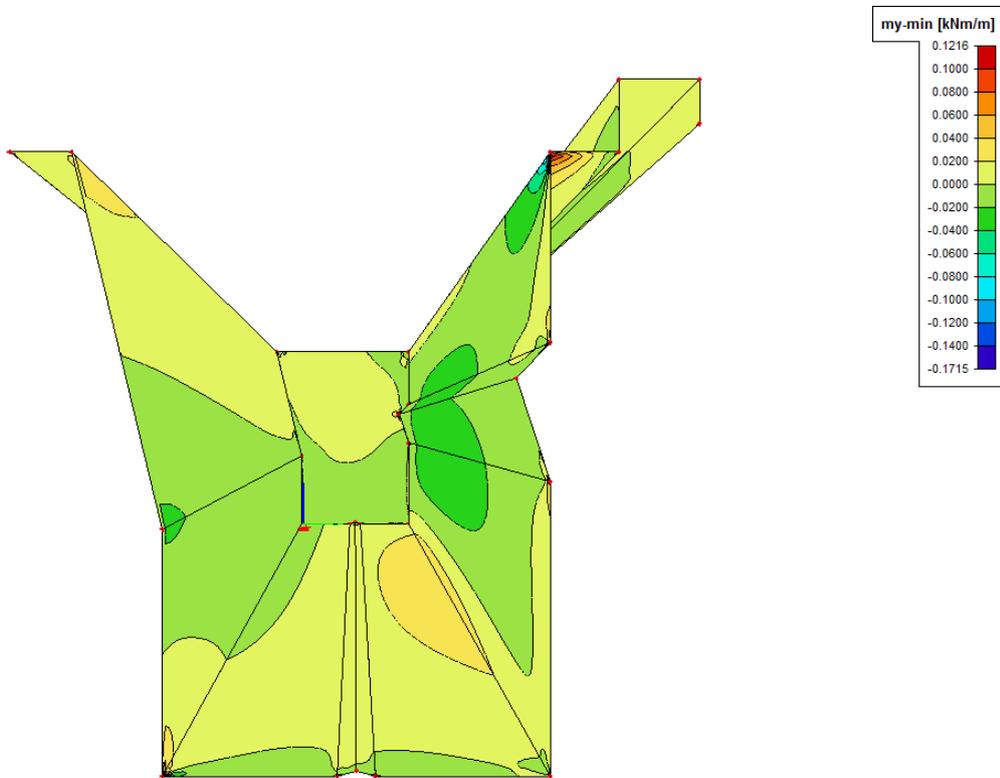


(b) Moment  $m_y$  aufgrund von LFK 3

Abbildung 44: Momente  $m$  aufgrund von ULS LFK 3



(a) Moment  $m_x$  aufgrund von LFK 4



(b) Moment  $m_y$  aufgrund von LFK 4

Abbildung 45: Momente  $m$  aufgrund von ULS LFK 4

Abbildung 46 zeigt alle im Grenzzustand der Tragfähigkeit berechneten Ergebnisse im Überblick.

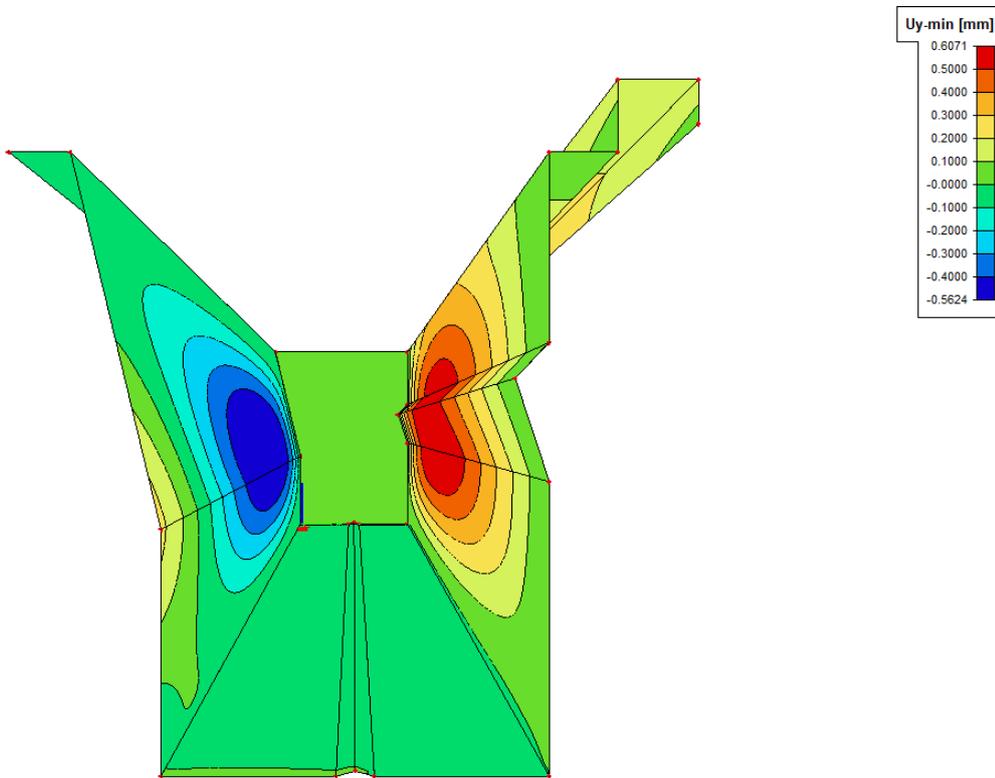
ULS										
$L_{\text{Rinne}} = 1000 \text{ mm}$	Spannung [ $\text{N/mm}^2$ ]		Normalkraft [ $\text{KN/m}$ ]				Moment [ $\text{KNm/m}$ ]			
	$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E-}$	$n_{x,\text{max}}$	$n_{x,\text{min}}$	$n_{y,\text{max}}$	$n_{y,\text{min}}$	$m_{x,\text{max}}$	$m_{x,\text{min}}$	$m_{y,\text{max}}$	$m_{y,\text{min}}$
LFK 1	352,6845	354,3961	51,4129	-51,4133	50,9001	-211,0680	0,0915	-0,4060	0,0415	-0,1744
LFK 2	564,3469	589,4205	89,3550	-89,5356	158,0613	-355,0739	0,1669	-0,6575	0,0957	-0,2695
LFK 3	297,4565	397,3368	188,9528	-251,2207	708,1594	-239,5077	0,1717	-0,3610	0,0987	-0,1344
LFK 4	234,3079	351,8405	176,7477	-233,9003	660,3406	-233,3418	0,1730	-0,2537	0,1014	-0,1016

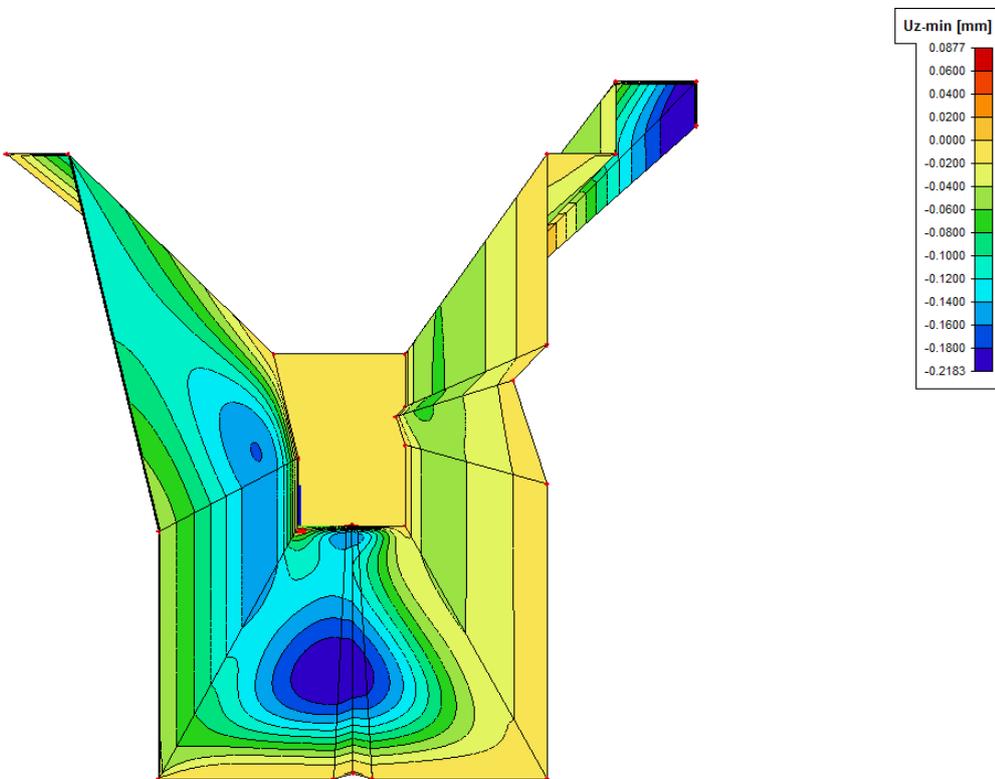
ULS										
$L_{\text{Rinne}} = 1500 \text{ mm}$	Spannung [ $\text{N/mm}^2$ ]		Normalkraft [ $\text{KN/m}$ ]				Moment [ $\text{KNm/m}$ ]			
	$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E-}$	$n_{x,\text{max}}$	$n_{x,\text{min}}$	$n_{y,\text{max}}$	$n_{y,\text{min}}$	$m_{x,\text{max}}$	$m_{x,\text{min}}$	$m_{y,\text{max}}$	$m_{y,\text{min}}$
LFK 1	465,9034	479,6308	65,1670	-65,1675	60,0013	-254,5875	0,1310	-0,5270	0,0715	-0,2763
LFK 2	790,1491	813,8024	116,1639	-116,1648	156,2382	-454,3732	0,2463	-0,9039	0,1472	-0,4494
LFK 3	463,6292	463,4858	202,1737	-251,0354	687,7718	-278,1987	0,2005	-0,5492	0,1186	-0,2459
LFK 4	325,1742	318,4129	191,4630	-235,8890	647,3224	-235,9025	0,1996	-0,3901	0,1216	-0,1715

Abbildung 46: ULS Ergebnisse Vergleichsspannungen und Schnittgrößen der Überlaufrinne

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verformungsergebnisse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für alle drei Gebrauchs–Lastfallkombinationen. Es werden die graphischen Ergebnisse der Verformungen  $U_y$  und  $U_z$  dargestellt.

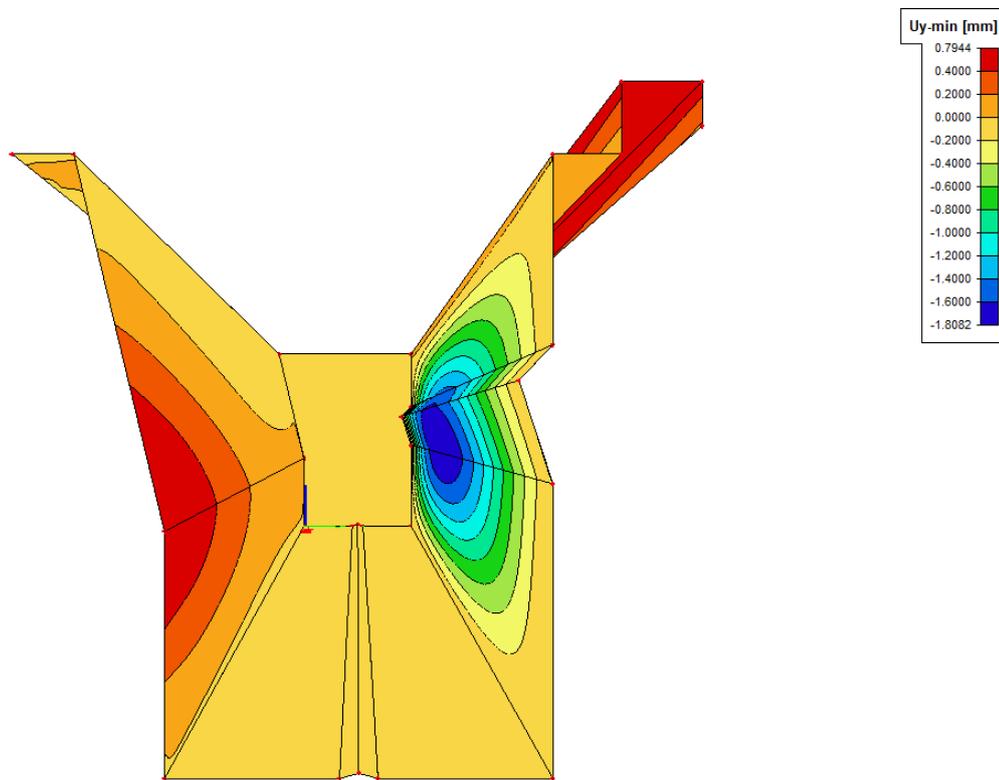


(a) Verformung  $U_y$  aufgrund von LFK 5

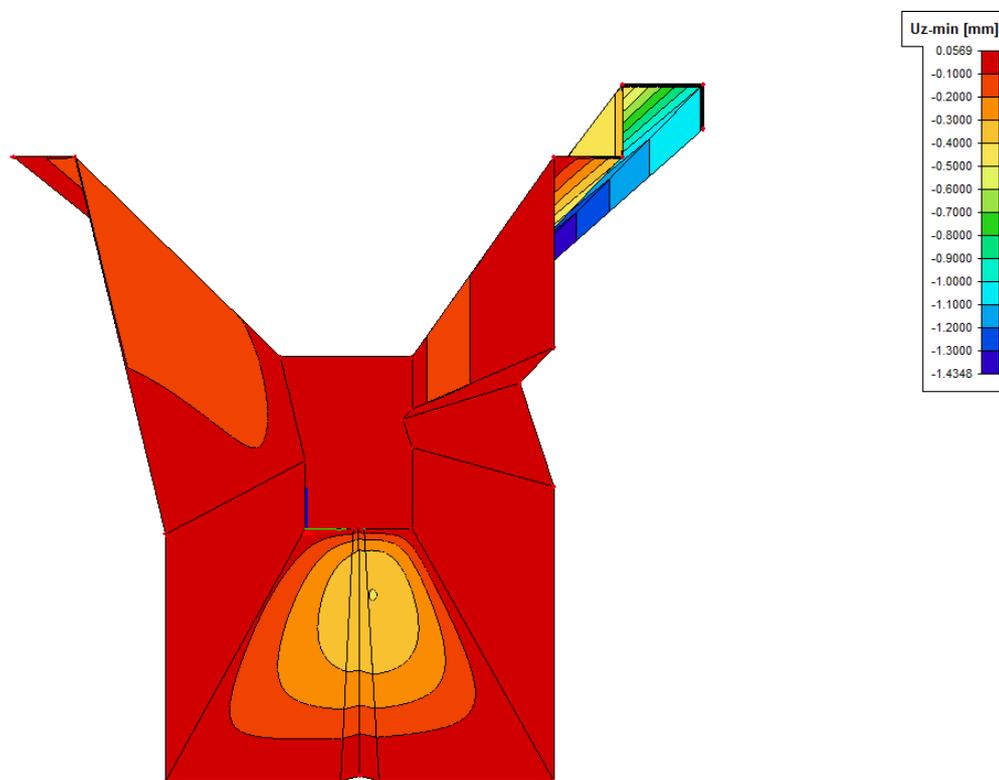


(b) Verformung  $U_z$  aufgrund von LFK 5

Abbildung 47: Verformungen  $U$  aufgrund von SLS LFK 5

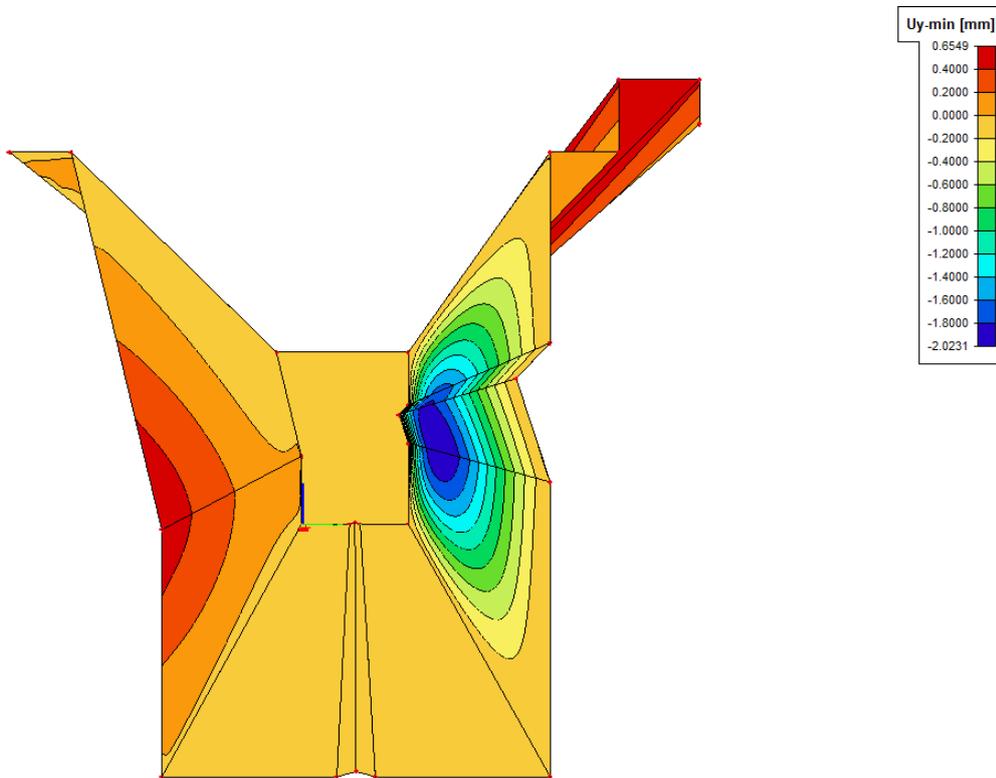


(a) Verformung  $U_y$  aufgrund von LFK 6

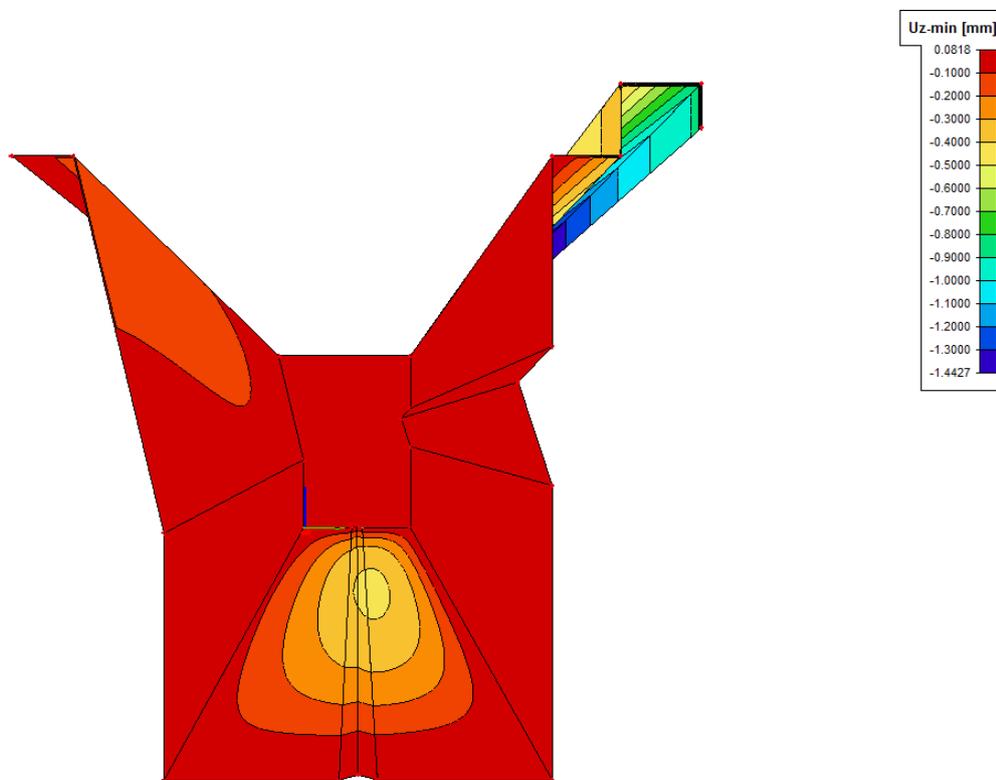


(b) Verformung  $U_z$  aufgrund von LFK 6

Abbildung 48: Verformungen  $U$  aufgrund von SLS LFK 6



(a) Verformung  $U_y$  aufgrund von LFK 7



(b) Verformung  $U_z$  aufgrund von LFK 7

Abbildung 49: Verformungen  $U$  aufgrund von SLS LFK 7

Abbildung 50 zeigt alle im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berechneten Ergebnisse im Überblick.

SLS				
$L_{\text{Rinne}} = 1000 \text{ mm}$	Verformung [N/mm]			
	$U_{y,\text{max}}$	$U_{y,\text{min}}$	$U_{y,\text{max}}$	$U_{y,\text{min}}$
LFK 5	0,3623	-0,3043	0,0086	-0,1613
LFK 6	0,5284	-0,9678	0,0409	-0,8487
LFK 7	0,4151	-1,0888	0,0503	-0,7881

SLS				
$L_{\text{Rinne}} = 1500 \text{ mm}$	Verformung [N/mm]			
	$U_{y,\text{max}}$	$U_{y,\text{min}}$	$U_{y,\text{max}}$	$U_{y,\text{min}}$
LFK 5	0,6071	-0,5624	0,0877	-0,2183
LFK 6	0,7944	-1,8082	0,0569	-1,4348
LFK 7	0,6549	-2,0231	0,0818	-1,4427

Abbildung 50: SLS Ergebnisse Verformungen der Überlaufrinne

Bei Betrachtung der Ergebnisse kristallisierte sich folgende Erkenntnis heraus. Bei den Lastfallkombinationen auf Traglastniveau wurden im Bereich um die Sickenausbildung herum extreme Spannungsspitzen beobachtet. Auch im Bereich der Symmetrieebene (eingespannte Lagerung) finden sich diese Spannungsspitzen wieder. Der übrige Teil der Überlaufrinne blieb im Gegensatz zu diesen Spannungsspitzen wenig beansprucht. Auch die ermittelten Verformungen sind stets kleiner als 2,1 mm für die berechneten Lastfallkombinationen.

Für den vorliegenden Fall der Rinnenkonstruktion mit einer Blechdicke von lediglich  $t = 1,5 \text{ mm}$  liegt eine dünnwandige Konstruktion vor. Daher wird im Folgenden noch kurz auf den Stabilitätsnachweis für die maßgebenden Lastfallkombinationen eingegangen.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass es kaum möglich ist, für diese Rinnenkonstruktion per Handrechnung einen Beulnachweis gemäß der aktuellen Normen zu führen. Daher wird folgende Vorgangsweise gewählt:

- 1. Schritt: Linear-elastische Berechnung für die ungünstigsten Lastkombinationen mit Ausgabe der Vergleichsspannungen sowie Plattenschnittkräfte
- 2. Schritt: Nichtlineare-elastische Berechnung für die ungünstigsten Lastkombinationen nach Theorie 2. Ordnung. In Abbildung 51 werden die Vergleichsspannungsergebnisse nach Th.1.O. sowie nach Th.2.O. dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Rinnenseitenwand auch die Stabilitätsbemessung zu keiner Spannungsüberschreitung führt. Spannungsspitzen an Singularitätsstellen seien davon ausgenommen. Aus diesem Grund kann behauptet werden, dass für die Bemessung der Überlaufrinne die berechneten Werte nach Th.1.O. für die Bemessung herangezogen werden dürfen.

ULS					
$L_{\text{Rinne}} = 1000 \text{ mm}$	Position	Spannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]			
		Th. I. O.	Th. II. O.	Th. I. O.	Th. II. O.
		$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E-}$	$\sigma_{E-}$
LFK 1	Boden rechts	27,2923	27,3138	26,9784	26,9973
LFK 2	Boden rechts	25,8583	25,8724	26,0112	26,0154
LFK 3	Sicke rechts	40,1411	39,7495	41,0920	40,8697
	Boden rechts	27,4902	27,1803	27,4016	27,3308
LFK 4	Sicke rechts	44,7457	44,0316	41,5705	40,6497
	Boden rechts	32,0661	31,8321	32,7011	32,4224

ULS					
$L_{\text{Rinne}} = 1500 \text{ mm}$	Position	Spannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]			
		Th. I. O.	Th. II. O.	Th. I. O.	Th. II. O.
		$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E+}$	$\sigma_{E-}$	$\sigma_{E-}$
LFK 1	Boden rechts	31,2916	31,6603	32,4092	32,6619
LFK 2	Boden rechts	27,2751	27,5899	29,6808	30,0012
LFK 3	Sicke rechts	50,5479	53,0941	58,2249	63,4854
	Boden rechts	40,2372	40,2983	42,2121	42,2455
LFK 4	Sicke rechts	48,9197	49,8953	58,4116	59,0672
	Boden rechts	45,7734	45,3773	49,1894	48,9105

Abbildung 51: Vergleichsspannungen der Überlaufrinne nach Th.I.O. und Th.II.O. im Vergleich

Für den Rinnenboden zeigt sich, dass die Ausnutzungen noch den Anteil aus der Fachwerk-Wirkung ( $\Delta\sigma_{x,\min} \approx -100\text{N}/\text{mm}^2$ ) aufnehmen können. Dabei ist anzumerken, dass dieser Wert konservativ anzusehen ist, da die Ausfachungen des Fachwerkes (Diagonalen und Vertikalstäbe) eine zusätzliche Stützwirkung für den Rinnenboden bewirken und dadurch die Biegespannungen sowie die Beulgefahr deutlich reduziert werden. Auf die Ausbildung einer mittigen Sicke - wie in allen Abbildungen der FE-Berechnung dargestellt - ist großes Augenmerk zu legen.

## 5 Bemessungsprogramm

### 5.1 Allgemein

Das Bemessungsprogramm, im weiteren auch *Bemessungstool* genannt, wurde auf Basis von Microsoft Office Excel 2007 erstellt. Da mehrere Rechenschritte nicht mehr alleine mit Microsoft Excel zu bewerkstelligen waren, wurde die Programmiersprache Visual Basic herangezogen und in das Bemessungsprogramm integriert. VBA ist eine objektorientierte Programmiersprache, deren neuere Versionen auf dem Microsoft .NET-Framework basieren. Bei Microsoft .NET spricht man von einer Plattform, die Werkzeuge und Technologien bereitstellt, um Programme zu entwickeln. Mit VBA lässt sich die bereits sehr ausgeprägte Funktionsvielfalt von Microsoft Excel noch um einiges erweitern und Anwendungen können den individuellen Bedürfnissen des Benutzers angepasst werden. Durch das Zusammenspiel der beiden Anwendungsprogramme wurde eine erhöhte Benutzerfreundlichkeit des erstellten *Bemessungstools* erreicht (Günther Born, 2006).

### 5.2 Installation

Um das *Bemessungstool* benützen zu können, sind ein paar Voreinstellungen von Nöten. Eine Version von Microsoft Office Excel 2007 ist die Grundvoraussetzung für die Inbetriebnahme des Programms. Die Makros der Arbeitsmappe müssen aktiviert sein und vor der ersten Benutzung sollte der Anwender sicherstellen, dass folgende Microsoft Excel Add-Ins installiert wurden:

- *SOLVER*: Das Add-In Solver wird bei der Rippenbemessung benötigt. Es ist eine Art Zielwertsuche, bei der mehrere Nebenbedingungen angeführt werden können.
- *Save as PDF*: Die Installation dieses Add-Ins ermöglicht dem User die Ergebnisdatei in eine PDF-Datei umzuwandeln.

Das *Bemessungstool* wurde mit relativen Pfaden ausgestattet, es wird aber dringendst empfohlen den Ordner mit dem Namen *Bemessungstool* auf den Pfad

*C:\Programme\Bemessungstool* zu hinterlegen. Sollte ein Betriebssystem verwendet werden, das nicht die Sprache Deutsch als Benutzersprache definiert hat, ist es notwendig, selbst einen Ordner mit dem Namen *Programme* zu erstellen und dort das Bemessungstool zu platzieren. Wie bereits erwähnt ist das Bemessungstool zwar mit relativen Pfaden ausgestattet, jedoch sind alle Arbeitsmappen mit dem zuvor erwähnten Standardpfad ausgestattet. Um Probleme mit der Aktualisierung der verknüpften Zellen auszuschließen, ist der oben angeführte Installationspfad zu wählen.

### 5.3 Aufbau

Da die Systemberechnung, die Berechnung der Stauhaut und die der Rippen für beide Lastniveaus eine Vielzahl an Berechnungsschritten erfordern und dies mit einem großen Datenaufwand gekoppelt ist, wurden jeder Teilbemessung eine eigene Arbeitsmappe zugeteilt. Weiters erfolgte eine Unterteilung für die beiden Traglastniveaus, dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS). Das dadurch entstandene *Bemessungstool* besteht aus insgesamt 13 verschiedenen Arbeitsmappen. Die Arbeitsmappen, welche den Grenzzustand der Tragfähigkeit behandeln, z.B. die Arbeitsmappe *Systemlösung\_ULS* unterscheidet sich nur geringfügig von den Arbeitsmappen, die die Berechnung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, z.B. *Systemlösung\_SLS*, vollziehen. Lediglich die Teilsicherheitsbeiwerte und die Ermittlung der Steifigkeitsmatrix für die Rippenbemessung sind in den beiden Arbeitsmappen unterschiedlich. Dies gilt für alle anderen Arbeitsmappen auch. Die Arbeitsmappe in der die Benutzeroberfläche erstellt wurde, trägt ebenfalls den Namen *Bemessungstool*. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird,

wenn über die Arbeitsmappe berichtet wird, immer der Begriff Arbeitsmappe vorangestellt. Für die Erläuterung der Arbeitsmappen Systemlösung und Rippentyp wird jeweils auf das Traglastkürzel verzichtet. Die einzelnen Arbeitsmappen tragen die folgenden Bezeichnungen:

- *Bemessungstool*
- *Systemlösung\_ ULS*
- *Systemlösung\_ SLS*
- *Rippentyp 1\_ ULS*
- *Rippentyp 1\_ SLS*
- *Rippentyp 2\_ ULS*
- *Rippentyp 2\_ SLS*
- *Rippentyp 3\_ ULS*
- *Rippentyp 3\_ SLS*
- *Rippentyp 4\_ ULS*
- *Rippentyp 4\_ SLS*
- *Ergebnisse*
- *Ergebnisse\_ Kurzfassung*

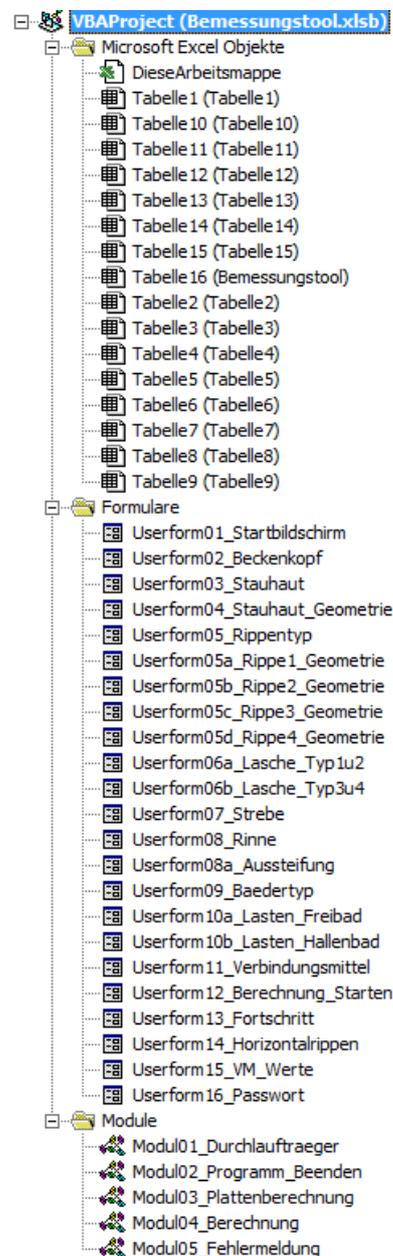
## 5.4 Arbeitsmappe Bemessungstool

Wie bereits erwähnt, besteht das Bemessungsprogramm aus insgesamt 13 Arbeitsmappen, die alle für die Berechnung der einzelnen Teilbereiche bzw. zur Darstellung der Ergebnisse von Nöten sind. Da diese Masterarbeit den Inhalt der Arbeitsmappe *Bemessungstool* zum Thema hat, wird in den folgenden Ausführungen genauer auf diese eingegangen. Die weiteren Arbeitsmappen werden kurz erwähnt und im Abschnitt Berechnungsablauf wird ein kleiner Einblick auf in die Funktionsweise der einzelnen Arbeitsmappen gegeben.

Die Arbeitsmappe *Bemessungstool* ist jene, von der aus alle anderen Arbeitsmappen gesteuert werden. Sie ist somit die Schaltzentrale des Bemessungsprogrammes. Sämtliche Berechnungen werden von der Arbeitsmappe *Bemessungstool* gestartet. Sie besteht aus insgesamt 16 Tabellenblättern, 23 Userformen<sup>9</sup> und 5 Modulen<sup>10</sup>. Abbildung 52 zeigt den Projekt-Explorer mit allen in der Arbeitsmappe befindlichen Objekten, in der hierarchischen Darstellung (Kolberg, 2007).

<sup>9</sup>Eine Userform ist eine benutzerdefiniertes Dialogfeld.

<sup>10</sup>Ein Modul enthält eine Definition für benutzerdefinierte Objekte.


 Abbildung 52: Objekte der Arbeitsmappe *Bemessungstool*

### 5.4.1 Tabellenblätter

Die Arbeitsmappe *Bemessungstool* besteht aus insgesamt 16 Tabellenblättern. Alle Tabellenblätter sind vom User während der gesamten Laufzeit des Programmes nicht einzusehen, es wird ihm lediglich das leere Tabellenblatt 16 als Hintergrund präsentiert. Sämtliche Berechnungen werden im Hintergrund geführt und alle zur Berechnung erforderlichen Eingaben des Benutzers werden über die VBA Userformen getätigt. Im Wesentlichen benötigt diese Arbeitsmappe den Großteil der Tabellenblätter für die Berechnung der Stauhaut, welche im Abschnitt Berechnungsablauf genauer erläutert wird. Zusätzlich werden einige Tabellenblätter für die Detailbemessungen in Anspruch

genommen. Es sollen nun nicht alle Tabellenblätter mit ihren Funktionen aufgezählt werden, es werden nur einige wichtige Informationen über einige Tabellenblätter gegeben, um einen Einblick in die Strukturierung zu gewinnen. Das Tabellenblatt, das keine Berechnungen beinhaltet, ist *Tabelle 1*. In *Tabelle 1*, auch Übergabeblatt genannt, werden alle vom User eingegebenen Werte über die VBA Userformen gesammelt. Jede Änderung in einer Userform wird sofort auf *Tabelle 1* übertragen. Die ständige Aktualisierung wird vor allem für interne Berechnungen benötigt, dessen Ergebnisse dem User als Information bei der Eingabe auf den folgenden Userformen sofort zur Verfügung stehen. Nach der Eingabe der zur Berechnung notwendigen Werte übergibt das Bemessungstool diese Werte an die Arbeitsmappe *Systemlösung\_ULS* bzw. an die Zellen der Arbeitsmappe *Bemessungstool*, die sie für die Stauhautberechnung benötigen. Das Tabellenblatt 1 beinhaltet die Bezeichnung und den Namen der Variable sowie den zugewiesenen Wert. Die *Tabellen 2* bis *13* sind für die Berechnung oder für die Darstellung der Stauhaut notwendig. Entweder sie dienen direkt zur Berechnung der Stauhaut oder sie werden für Berechnungen benötigt, die dem User als Information auf den Userformen wiedergegeben werden. Jedes Tabellenblatt ist mit einer Teilaufgabe zur Stauhautberechnung behaftet. Auch die in der Vorstudie berechneten Plattenergebnisse sind in den *Tabellen 5* und *6* zu finden. Auf dem Tabellenblatt 10 befindet sich die Systemskizze der Stauhaut mit ihren optionalen Horizontalrippen, welche in der Userform *Userform04\_Stauhaut\_Geometrie* angezeigt wird. *Abbildung 53* zeigt die Systemskizze mit jeweils 3 horizontalen Rippen oberhalb der Trittstufe und 3 horizontalen Rippen unterhalb der Trittstufe. Die Besonderheit dieser Systemskizze ist, dass sie sich automatisch an jede vom User getätigte Eingabe anpasst, d.h., jede Änderung wird dem User sofort in der Skizze angezeigt und er hat die Möglichkeit, seine Eingaben auf der eingblendeten Userform visuell zu überprüfen.

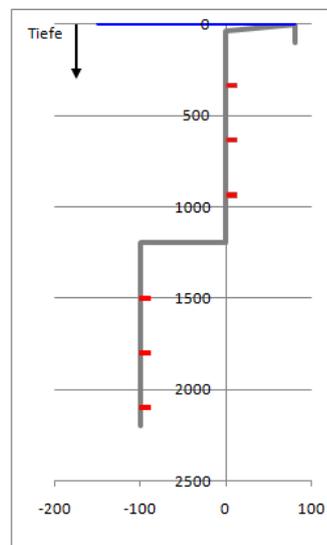


Abbildung 53: Stauhautskizze *Tabelle 10*

Die Bemessung der Horizontalrippen und des Fachwerkes werden in den *Tabellen 14* und *15* durchgeführt auf welchen sämtliche Nachweise für die einzelnen Bauteile vollzogen werden. *Tabelle 16* übernimmt keine Funktion, sie erscheint lediglich hinter den eingblendeten Userformen.

## 5.4.2 Userformen

Die Eingabemaske des *Bemessungstools* besteht nur aus Userformen, welche benutzerdefinierte Dialogfenster sind. Die Userformen dienen zugleich als Schutz für den auf den Tabellenblättern befindlichen Berechnungen. Durch das Einblenden der Userform kann der Benutzer nur erlaubte Aktionen auf dieser durchführen und die Tabellenblätter im Hintergrund nicht bearbeiten. Insgesamt beinhaltet diese Arbeitsmappe 23 Userformen. Diese Userformen werden, nach ihrem Erscheinen nach geordnet, folgendermaßen bezeichnet:

- *Userform01\_Startbildschirm*
- *Userform02\_Beckenkopf*
- *Userform03\_Stauhaut*
- *Userform04\_Stauhaut\_Geometrie*
- *Userform05\_Rippentyp*
- *Userform05a\_Rippentyp1\_Geometrie*
- *Userform05b\_Rippentyp1\_Geometrie*
- *Userform05c\_Rippentyp1\_Geometrie*
- *Userform05d\_Rippentyp1\_Geometrie*
- *Userform06a\_Lasche\_Typ1u2*
- *Userform06b\_Lasche\_Typ3u4*
- *Userform07\_Strebe*
- *Userform08\_Rinne*
- *Userform08a\_Aussteifung*
- *Userform09\_Baedertyp*
- *Userform10a\_Lasten\_Freibad*
- *Userform10b\_Lasten\_Hallenbad*
- *Userform11\_Verbindungsmitteltyp*
- *Userform12\_Berechnung\_Starten*
- *Userform13\_Fortschritt*
- *Userform14\_Horizontalrippen*
- *Userform15\_VM\_Werte*
- *Userform16\_Passwort*

Alle Userformen sind miteinander verknüpft und erleichtern dem User die Eingabe der benötigten Werte. Aufgrund der Verknüpfung hat der User die Möglichkeit zwischen den Userformen hin und her zu wechseln, er wird somit durch das Bemessungsprogramm geführt und kann die Userform nicht verlassen, ohne alle für die Berechnung notwendigen Werte einzugeben. Abbildungen 54 und 55 zeigen beispielhaft zwei Userformen, die der Benutzer bei der Eingabe der Werte in der Bildschirmmitte vorfindet.

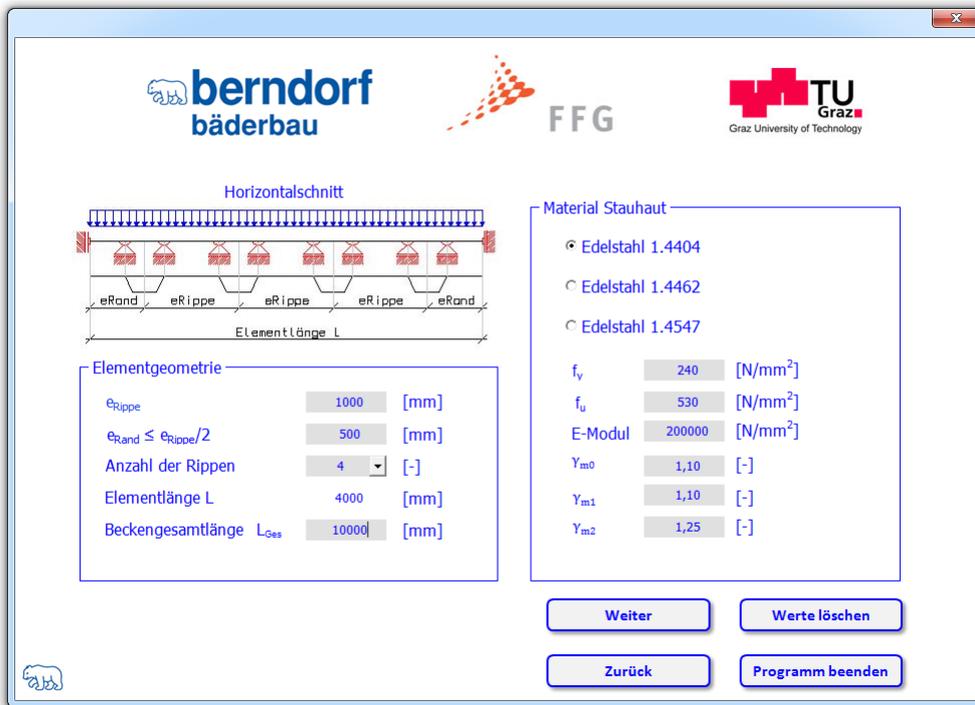


Abbildung 54: Userform03\_Stauhaut

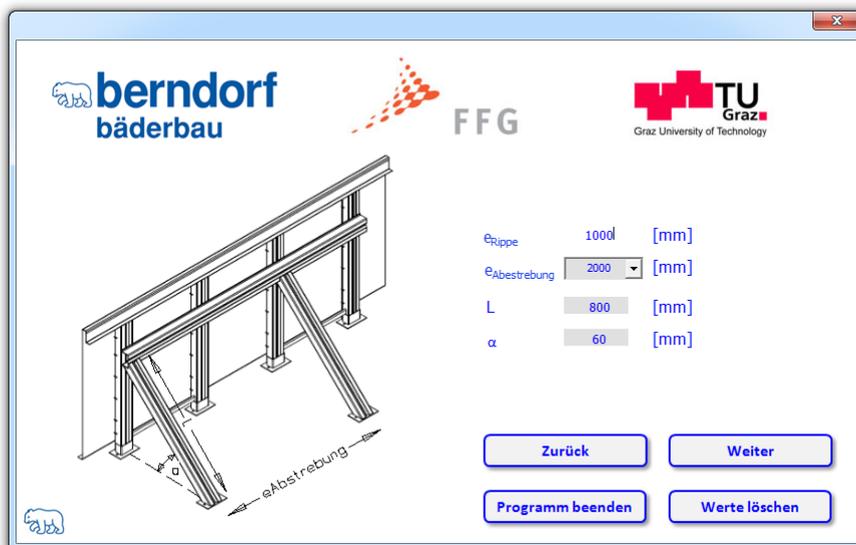


Abbildung 55: Userform07\_Strebe

In den folgenden Ausführungen wird die Funktionsweise der Userformen anhand von einigen Beispielen genauer erläutert. Weiters wird auf die einzelnen Steuerelemente<sup>11</sup> eingegangen. Auf den Userformen findet der Benutzer Textfelder, die die Eingabe von Werten ermöglicht, Bezeichnungsfelder, die nicht bearbeitet werden können, Abbildungen zur Erklärung der Eingaben sowie Befehlsschaltflächen (vgl. Abbildung 54).

Die Textfelder, auch als Eingabefelder bezeichnet, können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Graue Textfelder: Sie können vom User verändert werden.
- Weiße Textfelder: Sie können vom User nur eingesehen werden, eine Bearbeitung ist nicht möglich.

Das *Bemessungstool* schlägt beim Erscheinen einiger Userformen Werte in den grauen Textfeldern vor. Diese können vom User modifiziert werden oder vom Programm übernommen werden falls der User sie nicht verändert. Dies geschieht mit folgender Prozedur,<sup>12</sup> welche in Abbildung 56 gezeigt wird. Hier wird beim erstmaligen Aufrufen der Userform der *TextBox2* der Wert 75 und der *TextBox4* der Wert 24,5 vorgeschlagen.

```
Private Sub UserForm_Initialize()

    'Vorschläge für die Winkel alpha und beta für den Beckenkopf:
    TextBox2.Value = "75"
    TextBox4.Value = "24,5"

End Sub
```

Abbildung 56: Prozedur *Userform\_Initialize*

Werte, die in weißen Textfelder erscheinen, werden entweder von zuvor eingeblendeten Userformen übernommen oder intern berechnet und an die aktuelle Eingabe des Users angepasst. Ebenso wie weiße Textfelder können Bezeichnungsfelder und Abbildungen nicht vom User modifiziert werden. Sie dienen zur Beschreibung bzw. Erklärung der Eingabewerte.

In fast allen Userformen finden sich vier Befehlsschaltflächen<sup>13</sup> (vgl. Abbildung 54) wieder. Diese sind:

- *Weiter*
- *Zurück*
- *Werte löschen*
- *Programm Beenden*

**Weiter:**

Die Befehlsschaltfläche *Weiter* ermöglicht dem User nach Eingabe aller erforderlichen Werte zur nächsten Userform zu wechseln. Die aktuell eingeblendete Userform wird zuerst ausgeblendet, bevor

<sup>11</sup> Als Steuerelement versteht man Bedienelemente welche auf Ereignisse reagieren. Solche Steuerelemente sind unter anderem Befehlsschaltflächen, Textfelder, Listenfelder oder Optionsfelder

<sup>12</sup> Eine Prozedur ist jene Ebene in der VBA Struktur, in der die eigentlichen Aufgaben des Codes durchgeführt werden. Eine Sub-Prozedur führt eine oder mehrere Operationen durch und kann im Gegensatz zu der Function-Prozedur keinen Wert zurückgeben.

<sup>13</sup> Durch Betätigen der Befehlsschaltfläche wird eine Prozedur aufgerufen und somit eine Operation ausgeführt.

die nachfolgende Userform eingeblendet wird. In Abbildung 57 ist der Code der Befehlsschaltfläche *Weiter* zu sehen. Zusätzlich zum Ein- und Ausblenden der Userformen wird bei Betätigung der Schaltfläche überprüft ob, ein zur Berechnung benötigter Wert nicht eingegeben wurde. Beispielhaft wird der Code für die *TextBox1* gezeigt, für alle weiteren TextBoxen wird derselbe Code angewandt.

```
Private Sub Weiter_Click()  
  
'Überprüfung ob eines der Felder keinen Wert enthält:  
If TextBox1.Value = "" Then  
    Antwort = MsgBox("Bitte Wert für Rippenabstand eingeben!", vbOKOnly + vbExclamation, "Berndorf Bäderbau")  
    TextBox1.SetFocus  
    .....  
Else  
'Ausblenden der Userform03 und einblenden der Userform04:  
    Userform03_Stauhaut.Hide  
    Userform04_Stauhaut_Geometrie.Show  
End If  
  
End Sub
```

Abbildung 57: Prozedur *Weiter*

#### Zurück:

Analog zur Befehlsschaltfläche *Weiter* wird beim Aktivieren dieser Schaltfläche die aktuell eingeblendete Userform ausgeblendet und die zuvor eingeblendete Userform wieder aktiviert. Der User hat somit die Möglichkeit alle Userformen zu durchlaufen und gegebenenfalls seine Eingaben noch einmal zu überprüfen und zu verändern. Im Gegensatz zur Befehlsschaltfläche *Weiter* werden jedoch die Textfelder nicht auf die Vollständigkeit der Werte überprüft, da der Benutzer im Regelfall wieder zu dieser Userform zurückkehren und seine Eingaben vervollständigen muss, um zur nachfolgenden Userform zu gelangen. In Abbildung 58 befindet sich der Code für diese Prozedur.

```
Private Sub Zurueck_Click()  
  
'Ausblenden der Userform03 und Einblenden der Userform02:  
Userform03_Stauhaut.Hide  
Userform02_Beckenkopf.Show  
  
End Sub
```

Abbildung 58: Prozedur *Zurück*

#### Werte löschen:

Die Schaltfläche *Werte löschen* löscht alle vom Benutzer eingegebenen Werte in der jeweiligen Userform aus den Textfeldern bzw. setzt die Werte auf dem vom Programm vorgeschlagenen Standardwert zurück.

```

Private Sub WerteLoeschen_Click()

'Dialogfeld zur Bestätigung des Löschvorganges:
antwort = MsgBox("Alle Werte löschen?", vbYesNo + vbQuestion, "Berndorf Bäderbau")
If antwort = 6 Then
'Löschen der Werte:
TextBox1.Value = ""
TextBox2.Value = ""
TextBox3.Value = ""
TextBox4.Value = ""
'Zurücksetzen der Standardwerte:
OptionButton1.Value = True
TextBox1.SetFocus
ComboBox1.Value = "2"
Else
End If

End Sub
    
```

 Abbildung 59: Prozedur *Werte löschen*

### Programm Beenden:

Mit Hilfe der Befehlsschaltfläche *Programm Beenden* kann der Benutzer das Programm jederzeit verlassen, ohne jedoch seine eingegebenen Werte zu speichern.

```

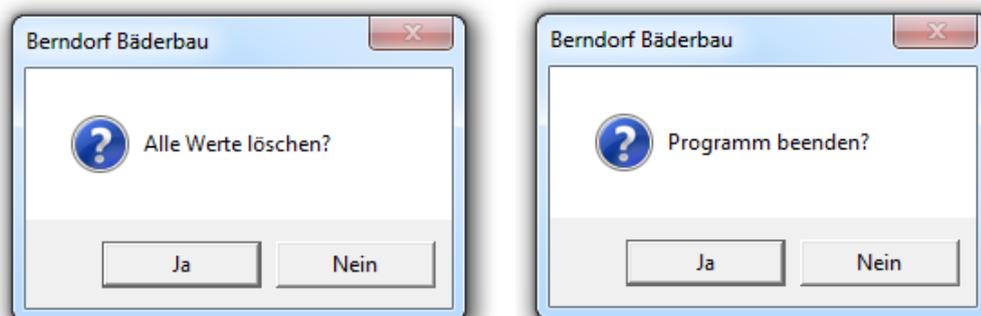
Public Sub Programm_Beenden()

'Dialogfeld zur Bestätigung:
antwort = MsgBox("Programm beenden?", vbYesNo + vbQuestion, "Berndorf Bäderbau")
If antwort = 6 Then
'Verlassen des Programmes ohne zu speichern:
Application.DisplayAlerts = False
Application.Quit
Else
End If

End Sub
    
```

 Abbildung 60: Prozedur *Programm Beenden*

Beim Betätigen der Befehlsschaltflächen *Werte löschen* und *Programm beenden* erscheint ein Dialogfeld, auf welchem der User sein Vorhaben bestätigen muss. Dies schützt den Benutzer vor un-freiwilligem Datenverlust. In Abbildung 61 sind die beiden Dialogfelder ersichtlich.



(a) Dialogfeld Werte löschen

(b) Dialogfeld Programm beenden

Abbildung 61: Dialogfelder

### 5.4.3 Module

Im Gegensatz zu den VBA-Anweisungen der Userformen, beinhalten Module in der Arbeitsmappe *Bemessungstool* Definitionen für benutzerdefinierte Objekte. Sie enthalten die eigentlichen Berechnungsschritte, die unter anderem zur Bemessung der Platten benötigt werden. Diese Module enthalten VBA Anweisungen und können innerhalb anderer Prozeduren aufgerufen und ausgeführt werden. Dies geschieht mit der *Call* Funktion. Diese Funktion ist in der Lage die in einem Modul befindliche Prozedur aufzurufen und zu starten. In der Arbeitsmappe *Bemessungstool* befinden sich 4 Module. Diese sind wie folgt benannt:

- *Modul01\_Durchlauftraeger*
- *Modul02\_Programm\_Beenden*
- *Modul02\_Plattenberechnung*
- *Modul04\_Berechnung*
- *Modul05\_Fehlermeldung*

#### *Modul01\_Durchlauftraeger:*

Dieses Modul dient zur Berechnung eines Durchlaufträgers mit n Feldern nach der Allgemeinen Deformationsmethode. In einem ersten Versuch der Vorstudie wurde versucht, die Plattenverformungen und Spannungen mittels einer Durchlaufträgerrechnung zu beschreiben. Da dies jedoch zu unbefriedigenden Ergebnissen führte, wurde die Plattenberechnung mittels FE-Methode gelöst. Da die Durchlaufträgerrechnung für die Bemessung nicht mehr relevant ist, wird nicht näher darauf eingegangen und sei nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

#### *Modul02\_Programm\_Beenden:*

Mit Hilfe dieses Moduls, das auf jeder Userform aufgerufen werden kann, hat der Benutzer jederzeit die Möglichkeit, das Programm ohne die Werte zu speichern zu beenden. Mit Hilfe der Befehlschaltfläche *Programm Beenden* wird die Prozedur im *Modul02\_Programm\_Beenden* gestartet (vgl. Abbildung 60)

#### *Modul03\_Plattenberechnung:*

Wird das *Modul03\_Plattenberechnung* aufgerufen so wird die Stauhautberechnung in der Arbeitsmappe *Bemessungstool* gestartet.

#### *Modul04\_Berechnung:*

Das Modul Berechnung startet den gesamten Berechnungsvorgang. Dieser beinhaltet die Systemlösung, die Stauhautbemessung, die Rippenbemessung und die Bemessung der Detailpunkte. Innerhalb dieses Moduls werden sowohl Aktionen in der Arbeitsmappe *Bemessungstool* durchgeführt als auch weitere Module in anderen Arbeitsmappen angesteuert. Das Modul Berechnung beinhaltet somit den kompletten Berechnungsablauf und ist sozusagen das Herzstück des Programmes.

## 5.5 Weitere Arbeitsmappen

Da das Bemessungsprogramm aus mehreren Arbeitsmappen besteht, werden sie hier der Vollständigkeit halber noch kurz erwähnt und ihre Funktion in einigen Worten erklärt. Aus der Arbeitsmappe *Systemlösung* bezieht das Bemessungstool die Schnittkräfte der unterschiedlichen Systeme, die zur Bemessung der einzelnen Rippentypen benötigt werden. Weiters liefert die Systemlösung die Belastung für die Plattenbemessung welche in Gleich- und Linienlast aufgeteilt sind. Ferner stellt diese Arbeitsmappe die für die Plattenbemessung notwendigen maßgebenden Lastfallkombinationen zur Verfügung. Die Arbeitsmappen *Rippentyp 1*, *Rippentyp 2*, *Rippentyp 3* und *Rippentyp 4* unterziehen die verwendeten Rippen einer Beulbemessung nach ON EN 1993-1-4: 1996 bzw. ON EN 1993-1-5: 1996 für beide Traglastniveaus.

Um alle berechneten Ergebnisse übersichtlich darzustellen wurden zwei weitere Arbeitsmappen mit dem Namen *Ergebnisse* und *Ergebnisse\_Kurzfassung* angefertigt. Diese Arbeitsmappen beinhalten alle vom User eingegebenen Werte, die zur Berechnung notwendig waren, sowie eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Arbeitsmappen *Systemlösung* und dem verwendeten Rippentyp. Alle für den Benutzer relevanten Nachweise werden ebenso angezeigt wie die bemessungsrelevanten Lastfallkombinationen und die Spannungs- und Verformungsgrößen der verwendeten Rippen und der Stauhaut. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Ergebnisdateien liegt in der Größe der Datei, welche maßgeblich durch die Schnittkraftbilder der einzelnen Systemlösungen bestimmt wird. Die Kurzversion enthält alle Zahlenwerte, die auch in der ausführlichen Druckversion enthalten sind, sie beinhaltet jedoch keine Schnittkraftbilder der Systemlösung. Die lange Anfertigungszeit der *PDF*-Datei gab den Ausschlag für eine Anfertigung einer Kurzversion, welche nur wenige Sekunden dauert. Im Gegensatz zur Kurzversion nimmt die ausführliche Version mehrere Minuten in Anspruch.

## 5.6 Berechnungsablauf

Der Berechnungsablauf kann grundsätzlich in 5 Abschnitte eingeteilt werden. Diese können wie folgt beschrieben werden:

- Vor der eigentlichen Berechnung werden alle Werte über eine Eingabemaske gesammelt.
- Als erster Berechnungsschritt wird die Systemberechnung gestartet. Diese liefert für alle auftretenden Lastfallkombinationen die Belastungen für die Plattenbemessung, die Schnittgrößen für die Rippenbemessung sowie die Detailbemessungen.
- Anschließend erfolgt die Berechnung der Plattenverformungen und der Plattenspannungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.
- Der dritte Schritt des Berechnungsablaufes ist ein iterativer Prozess, mit deren Hilfe die Spannungs- und Beulbemessung der Rippe durchgeführt wird.
- Als letzter Schritt werden alle Ergebnisse der Berechnungen gesammelt und eine Ergebnisdatei erstellt.

Da die Bemessung der Detailpunkte im Vergleich zu den anderen Schritten sehr wenig Zeit in Anspruch nimmt, ist sie hier nicht extra angeführt, wird jedoch bei jedem Berechnungsdurchgang wie alle anderen Bemessungsschritte stets ausgeführt. Wie bereits erwähnt, werden alle für die Berechnung erforderlichen Eingaben über Userformen getätigt und auf Tabellenblatt 1 der Arbeitsmappe *Bemessungstool* gesammelt. Nach der Eingabe aller Werte und dem Starten des Moduls *Berechnung* beginnt das Programm schrittweise die VBA Instruktionen in diesem Modul abzuarbeiten. Als letzter Schritt werden die berechneten Ergebnisse sowie sämtliche Lastfallkombinationen und alle Eingabeparameter übersichtlich dargestellt. Abbildung 62 soll einen groben Überblick über den Ablauf der Berechnung geben, welche sich in fünf Teile unterteilen lässt.



Abbildung 62: Berechnungsablauf

In diesem Abschnitt wird der genaue Ablauf des Bemessungsprogrammes erklärt. Vorab sollte noch kurz auf die Berechnungsdauer des *Bemessungstools* eingegangen werden. Insgesamt dauert der gesamte Berechnungsablauf ca. 3 Minuten. Diese lange Rechenzeit ist wie folgt begründet. Die Systemberechnung, die auf dem Kraftgrößenverfahren basiert, beschlagnahmt den größten Anteil der Berechnungszeit. Die integrierte Matrizenrechnung liefert die Schnittgrößen der einzelnen Systeme, wobei die je 58 Lastfallkombinationen der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit für die unterschiedlichen Belastungsannahmen hauptverantwortlich für den großen Zeitaufwand sind. Da die Rippenbemessung einen iterativen Prozess beinhaltet, kann auch hier die Berechnungszeit kaum verbessert werden. Bei den Rippentypen 1 und 2 erfolgt dieser Prozess schneller als bei den Typen 3 und 4 da diese weniger Nebenbedingungen erfüllen müssen.

### 5.6.1 Systemberechnung

Die folgenden Ausführungen erklären den Berechnungsablauf Schritt für Schritt ohne dabei genauer auf die VBA Anweisungen einzugehen. Alle in weiterer Folge angeführten Aktionen beinhaltet das Modul *Berechnung*. Dieses Modul gibt somit den genauen Berechnungsablauf vor und steuert alle nötigen Aktionen um die Bemessung der Beckenstruktur abzuschließen. In einem ersten Schritt wird die Arbeitsmappe *Systemlösung* geöffnet. Nach dem Öffnen der Arbeitsmappe werden alle zur Systemberechnung erforderlichen Eingaben des Benutzers in die dafür vorgesehene Zellen in der Arbeitsmappe *Systemlösung* übertragen. Nach dem Übertragen der Werte wird ein Modul in der Arbeitsmappe *Systemlösung* gestartet. Es werden die in den folgenden drei Abbildungen ersichtlichen statischen Systeme mit Hilfe der Kraftgrößenmethode gelöst und die Schnittkraftbilder der Momente, Querkräfte und Normalkräfte dargestellt.

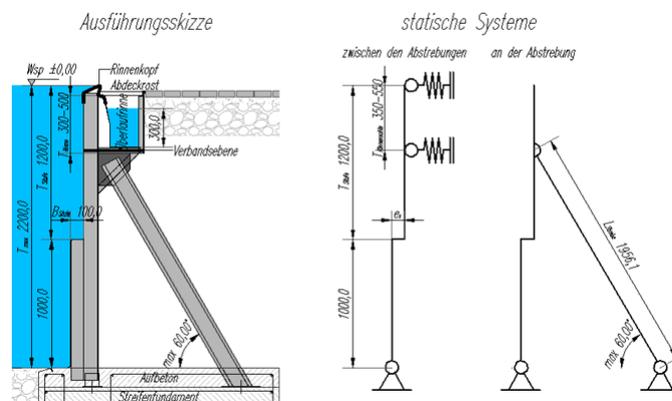


Abbildung 63: Statisches System Freibad inklusive Aufbeton

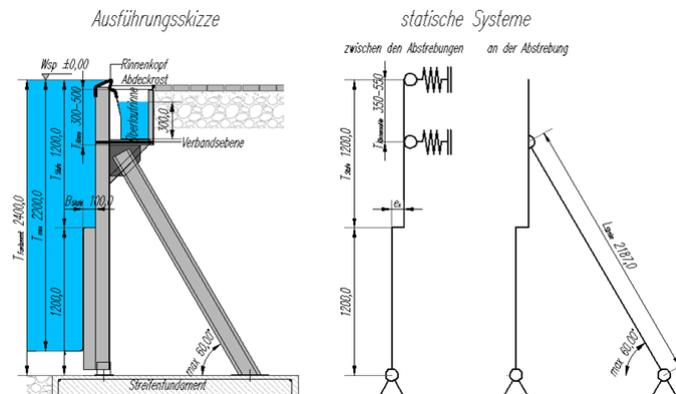


Abbildung 64: Statisches System Freibad exklusive Aufbeton

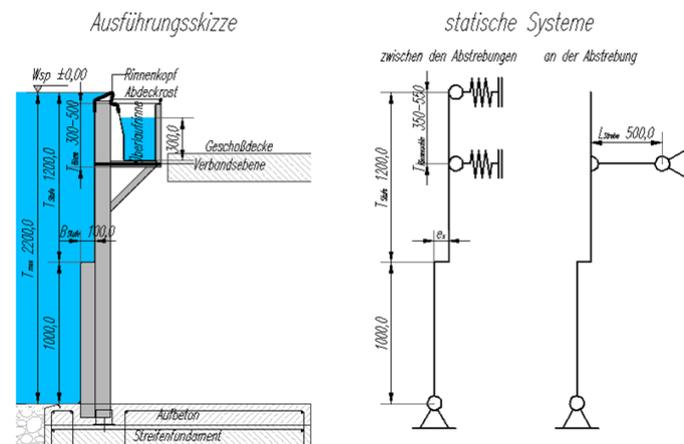


Abbildung 65: Statisches System Hallenbad inklusive Aufbeton

Weiters wird der Belastungsvektor, aufgeteilt in Gleichlast bzw. Dreieckslast, für die Stauhaut errechnet und ausgegeben. Auch die Schnittgrößen für die Bemessung der Detailpunkte werden aus der Systemlösung herangezogen. Die Systemlösung liefert somit alle auftretenden Schnittgrößen für die Plattenbemessung, die Bemessung der horizontalen Rippen und auch die der Fachwerkkonstruktion unter der Überlaufrinne.

## 5.6.2 Plattenberechnung

Nach der Systemberechnung wird der Belastungsvektor in die Arbeitsmappe *Bemessungstool* übertragen, wo die Plattenberechnung ansteht, auf welche in den nächsten Schritten ausführlich eingegangen wird. Wie bereits erwähnt wurde im Vorfeld eine FE-Plattenbemessung mit zwei unterschiedlichen Auflagerbedingungen durchgeführt. Die beiden Auflagerbedingungen resultieren daraus, dass alle Platten als starr eingespannt angenommen wurden bis auf die letzte Stauhautplatte am Beckenboden, welche gelenkig modelliert wurde.

Die Aufbereitung der Ergebnisse der in der Vorstudie durchgeführten FE-Rechnung (vgl. Abschnitt 2.2) hat zur Folge, dass nicht nur die unter Abschnitt 2.1.7 ermittelten a/b-Seitenverhältnisse

berechnet werden können, sondern jede beliebige Platte bei gegebenen Auflagerbedingungen. Aus diesem Grund müssen für die in Abschnitt 2.1.7 nicht angegebenen Werte lineare Interpolationen erfolgen. Diese Interpolationen werden nach folgender allgemeinen Gleichung getätigt.

$$f(x) = \frac{f_0 - f_1}{x_0 - x_1} \cdot (x - x_0) \quad [-] \quad (9)$$

Es sind somit zwei Interpolationen notwendig, eine für das Seitenverhältnis  $a/b$  und eine weitere für das Verhältnis  $l_i/a$ . Die Interpolationen laufen folgendermaßen ab. Auf dem Tabellenblatt 7 werden die  $a/b$ -Verhältnisse der einzelnen Teilplatten berechnet und gleichzeitig die oberen und unteren Grenzwerte für die Interpolation bestimmt. Das selbe geschieht für das  $l_i/a$ -Verhältnis. Entsprechen die Werte denen in den Tabellen angeführten Werten, so werden die  $k_b$ -Werte direkt aus der Tabelle entnommen. Ist das nicht der Fall, folgt der Interpolationsschritt. Vereinfacht kann gesagt werden, dass das Programm den berechneten  $a/b$ -Wert der Platte in der Tabelle sucht, findet er den exakten Wert, wird er übernommen, kann er nicht gefunden werden wird er über die Interpolation ermittelt. Mit den bereitgestellten  $k_b$ -Werten können dann anschließend die Verformungen nach den Gleichungen (1) und (2) sowie die Spannungen nach den Gleichungen (5) und (6) für die Gleichlast und für die Dreiecklast berechnet werden. In einem weiteren Schritt werden die Spannungen aus der Gleichlast mit den Spannungen aus der Dreiecklast superponiert. Es sei darauf hingewiesen, dass die Dreiecklast und die Gleichlast ihre maximalen Spannungen nicht an der exakt selben Stelle aufweisen. Nach Warren C. Young (1997) treten die maximalen Größen aufgrund einer Dreiecklast bei allseitiger Einspannung nicht in Plattenmitte, sondern bei 0,45 % der Seitenlänge der Platte auf, im Gegensatz zu einer Gleichlast, bei der sie sich in der Regel in Plattenmitte befinden. Somit werden eigentlich zu konservative Gesamtspannungen ausgegeben, was sich aber bei den Vergleichsrechnungen nicht ausdrücklich widerspiegelte. Eben genanntes ist auch für die Verformungsberechnung zutreffend. Der Effekt und somit der Fehler der Superposition vergrößert sich mit Zunahme der Plattengröße, bleibt aber stets im vernachlässigbaren Bereich, wie die Vergleichsrechnung ohne horizontale Rippen zu erkennen gab. Die Berechnung liegt somit auf der konservativen Seite bringt aber eine Reserve mit sich, was bei hohen Ausnutzungsgraden der Nachweisführung als Argument dienen kann. Als Ergebnis der Superposition erhält man somit die elastischen Verformungs- und Spannungsgrößen aller verwendeten Einzelplatten.

Werden nun, wie bei einer Stauhaut mit horizontalen Rippen, mehrere Einzelplatten aneinandergesetzt, so kommt es zu Spannungsumlagerungen zwischen den einzelnen Platten. Um die auftretenden Spannungsumlagerungen zu erfassen, folgt im Anschluss das Spannungsausgleichsverfahren<sup>14</sup> für die  $\sigma_y$ -Werte an den Plattenstößen nach Schmaußer (1971). Dieses Verfahren ist nur möglich, wenn die Plattenfelder in eine Richtung konstante Stützweiten vorweisen, was mit dem Rippenabstand erfüllt wird. Hierbei wird jede Einzelplatte mit ihrer Steifigkeit behaftet und die Spannungen an den Plattenstößen mit ihrer und den Steifigkeiten der angrenzenden Platten gewichtet. Dies führt zu einer Reduktion der Spannungen an den Plattenstößen und zu einer Erhöhung der Platten-spannungen in Plattenmitte. Die folgenden Ausführungen sollen das Spannungsausgleichsverfahren erklärt.

Treffen zwei unterschiedlich große Platten, welche in den folgenden Ausführungen als Platte  $i$  und Platte  $i+1$  bezeichnet werden, aufeinander, wobei der Plattenstoß mit Rand  $i$ , und die beiden anderen Ränder mit Rand  $i-1$  bzw. Rand  $i+1$  bezeichnet werden, so ergibt sich die Spannung in  $y$ -Richtung am Rand  $i$  nach Gleichung (10).

$$\sigma_i = \nu_{i,i+1} \cdot \sigma_{i,i} + \nu_{i,i} \cdot \sigma_{i,i+1} \quad (10)$$

<sup>14</sup>Nach Schmaußer (1971) wird das Verfahren als Momentenausgleichsverfahren bezeichnet. Es lässt sich aber mit Spannungen im gleichen Maße durchführen.

Der erste Index der Gleichung definiert die Nummer des Randes und der zweite Index die Nummer der Platte. Die Verteilerzahlen  $\nu_i$  und  $\nu_{i+1}$  werten die Steifigkeiten der aneinandergrenzenden Platten und behaftet diese mit einem Wert. Die Verteilerzahlen für den Rand  $i$  der Platten  $i$  und  $i+1$  lauten wie folgt.

$$\nu_{i,i} = \frac{\lambda_{i,i}}{\lambda_{i,i} + \lambda_{i,i+1}} \quad [-] \quad (11)$$

$$\nu_{i,i+1} = \frac{\lambda_{i,i+1}}{\lambda_{i,i} + \lambda_{i,i+1}} \quad [-] \quad (12)$$

Die Steifigkeiten, auch Steifheitszahlen genannt, wurden den folgenden Tabellen entnommen. Für die Trittstufe (Platten mit einem  $a/b$ -Verhältnis kleiner 0,2) wurde die Tabelle 4 modifiziert und mit den veränderten Steifigkeitswerten bestückt um das Verlagern der Spannungen hin zur Trittstufe zu erfassen. Anstatt des Wertes  $\infty$  wurde der Rechenwert 1000 für das Bemessungsprogramm verwendet.

$\frac{a}{b}$	$\lambda_{\frac{a}{b^3}}$	$\lambda_{\frac{a}{b^3}}$	$\lambda_{\frac{a}{b^3}}$
$\infty$	4	3	2
8	4,05	3,07	2,08
5	4,13	3,19	2,23
4	4,22	3,32	2,38
3	4,39	3,60	2,71
2,5	4,60	3,89	3,06
2	5,00	4,45	3,72
1,75	5,32	4,88	4,23
1,5	5,82	5,53	5
1,25	6,81	6,69	6,38
1	8,38	8,36	8,36
0	8,38	8,36	8,36

Tabelle 4: Steifheitszahlen für das Spannungsausgleichsverfahren

Somit wurde eine Reduktion der Randspannung der Plattenfolge in  $y$ -Richtungen im Vergleich zur Einzelplatte erreicht. Auf eine Erhöhung der Feldspannungen um den Differenzwert der Randspannungen vor und nach dem Spannungsausgleichsverfahren wurde verzichtet, da sich die maßgebenden Spannungen für die Bemessung der Platte immer am Plattenstoß und nicht in Plattenmitte befinden.

Nach dem Spannungsausgleichsverfahren werden Platten mit kleinem  $a/b$ -Verhältnis ( $a/b < 0,3$ ), was vor allem die Trittstufe betrifft, einer weiteren Berechnung unterzogen. Aufgrund der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Krümmungsänderung werden die Spannungen dieser Platten wie folgt berechnet. Der tatsächliche Spannungsverlauf der Trittstufe, welcher durch eine Parabel beschrieben ist, wird nach oben geschoben und zwischen den Randspannungen der beiden angrenzenden Platten eingehängt. Dies geschieht, indem zuerst der Stich der Spannungsparabel zwischen den Werten  $\sigma_{y,\text{unten}}$  und  $\sigma_{y,\text{oben}}$  der Trittstufe gemittelt berechnet wird, und dieser Betrag anschließend zu den gemittelten Randspannungen der beiden angrenzenden Platten addiert wird. Hinzuzufügen ist, dass bei der Trittstufe nicht wie bei allen anderen Einzelplatten die Steifigkeiten nach Schmaußer (1971) verwendet werden, sondern extra ermittelte Werte für die spezielle Lagerung herangezogen

werden (vgl. Tabelle 4), um den Effekt einer kleinen Platte auf die Ergebnisse noch genauer zu erfassen. Nach diesem Schritt erhält man alle elastischen Verformungs- und Spannungsergebnisse der gesamten Stauhaut. Dieser Vorgang wird für alle in den nachstehenden Tabellen angeführten Lastfallkombinationen durchgeführt. Tabelle 5 veranschaulicht alle auftretenden Lastfallkombinationen für den Bautyp Freibad.

	Wasserdruck	Erddruck aktiv (1)	Erdruhe- druck (2)	VKL aus (1)	VKL aus (2)	VKL Trittstufe
LFK 1	1,20	-	1,00	-	-	-
LFK 2	1,20	-	1,00	-	1,05	1,05
LFK 3	-	1,35	-	1,50	-	1,50
LFK 4	-	1,35	-	-	-	-

(a) ULS Lastfallkombinationen Freibad

	Wasserdruck	Erddruck aktiv (1)	Erdruhe- druck (2)	VKL aus (1)	VKL aus (2)	VKL Trittstufe
LFK 1	1,00	-	1,00	-	-	-
LFK 2	1,00	-	1,00	-	0,70	0,70
LFK 3	-	1,00	-	1,00	-	1,00
LFK 4	-	1,00	-	-	-	-

(b) SLS Lastfallkombinationen Freibad

Tabelle 5: Lastfallkombinationen Freibad zur Stauhautberechnung

In der Tabelle 6 sind die Lastfallkombinationen für den Bautyp Hallenbad für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit angeführt.

	Wasserdruck	Erddruck aktiv (1)	Erdruhe- druck (2)	VKL aus (1)	VKL aus (2)	VKL Trittstufe
LFK 1	1,20	-	-	-	-	-
LFK 2	1,20	-	-	-	-	1,05

(a) ULS Lastfallkombinationen Hallenbad

	Wasserdruck	Erddruck aktiv (1)	Erdruhe- druck (2)	VKL aus (1)	VKL aus (2)	VKL Trittstufe
LFK 1	1,00	-	-	-	-	-
LFK 2	1,00	-	-	-	-	0,70

(b) SLS Lastfallkombinationen Hallenbad

Tabelle 6: Lastfallkombinationen Hallenbad zur Stauhautberechnung

Da die Plattenberechnung aufgrund der Lastfallkombinationen mehrere Durchgänge erfordert, wurde sich bei der Programmierung dieses Vorganges einer Schleife beholfen. Sie durchläuft mit der Anzahl der Lastfallkombinationen das Modul Plattenberechnung und gibt für jede Kombination die errechneten elastischen Verformungen und Spannungen aus. Weiters werden aus diesen Lastfallkombinationen die plastischen Spannungsergebnisse errechnet. Dies geschieht über eine Division

der elastischen Spannungswerte durch den Faktor 1,5 welcher durch die unterschiedlichen Widerstandsmomente  $W_{\text{plastisch}} = \frac{t^2}{4}$  und  $W_{\text{elastisch}} = \frac{t^2}{6}$  begründet ist. Alle beschriebenen Vorgänge werden für die Bädertypen Hallenbad und Freibad gleichzeitig durchgeführt. Die Unterscheidung ob das Becken eine Trittstufe oder keine besitzt wird jedoch vor Beginn der Berechnung gefällt. Mit Hilfe der Interpolationen und der angeführten Vorgänge lassen sich somit die Spannungen und Verformungen aufgrund von linearen Lasten bei gegebenen Auflagerbedingungen bestimmen und ausgeben. Für die Nachweisführung wird jeweils der maximale Spannungswert pro Platte herangezogen und der zulässigen Spannung gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung samt den gesammelten Ergebnissen der Plattenverformungen und Spannungen für beide Traglastniveaus werden in einem letzten Schritt an die Ausgabedatei übermittelt.

Ein wesentlicher Punkt, der noch angeführt werden muss, ist, dass die begünstigende Wirkung der beiden Spannungen in y-Richtung ( $\sigma_{y,\text{unten}}$  und  $\sigma_{y,\text{oben}}$ ) bei Verwendung von U-Profilen als Horizontalrippen vernachlässigt wurde. Bei einer Standardbreite der Horizontalrippe von 60 mm dient diese eigentlich als Auflager mit ihrer gesamten Breite, die Plattenberechnung erfolgt jedoch mit einem Linienlager und vernachlässigt diese begünstigende Wirkung. Wie im Betonbau hätte man die Möglichkeit, die Auflagerbreite in Rechnung zu stellen und das maximale Stützmoment um den Betrag  $\Delta M_{Ed}$  zu reduzieren, welches sich nach Gleichung (13) ergibt (Sparowitz, 2004):

$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed} \cdot b_{zw,rippe}}{8} \quad (13)$$

Mit:

$\Delta M_{Ed}$  Ausrundungsmoment

$F_{Ed}$  Auflagerkraft unter maximalen Stützmoment

$b_{zw,rippe}$  Auflagerbreite

Aufgrund der Auflagersituation am U-Profil, für welches in der Regel die Horizontalrippe verwendet wird, würde sich Gleichung (13) zu Gleichung (14) verändern.

$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed} \cdot b_{zw,rippe}}{4} \quad (14)$$

Vereinfachend kann man die reduzierten Stützmomente auch über einen Abminderungsfaktor  $(l_i/1)^2$  bezogen auf die Stützmomente in Auflagermitte ermitteln, was in Abschnitt 5.6.3 gezeigt wird.

Die Anwendung dieser Gleichung führt zum Ausrunden des Stützmomentes und somit zu einer Reduktion der Stützmomente– bzw. Spannungen. Da die Auflagerbreite bei der Plattenbemessung nicht in Rechnung gestellt wird, kann davon ausgegangen werden, dass sich die ermittelten Stützspannungen auf der konservativen Seite befinden. Abbildung 66 soll den Unterschied zwischen der Berechnung des Bemessungstools und der tatsächlichen Spannung verdeutlichen. Vereinfacht am Durchlaufträger zeigt das obere Bild die ermittelte Spannung mit Hilfe des Bemessungsprogrammes und das unter Bild stellt die tatsächliche Spannungsverteilung über der Rippe dar.

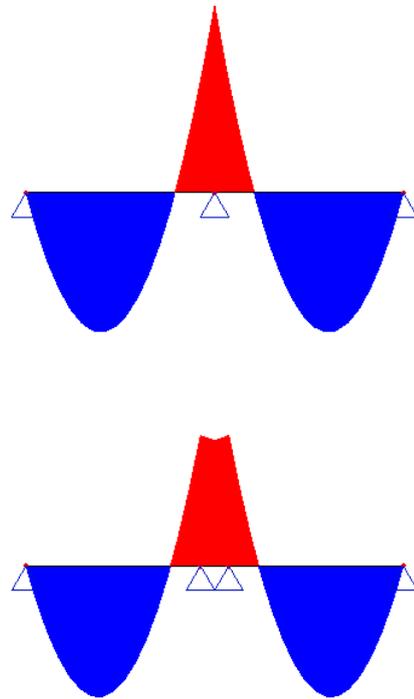


Abbildung 66: Unterschied zwischen FE-Modell und tatsächlicher Lagerbedingung bei Ermittlung der Stützspannungen

Es sollte auch erwähnt werden, dass vor der eigentlichen Plattenbemessung mit den angeführten Lastfallkombinationen eine Berechnung mit den Belastungen ohne Kombinationsfaktoren durchgeführt wird, da diese Werte für die Rippenbemessung benötigt werden. Sie werden für einen Vergleichsspannungsnachweis bei der Bemessung der vertikalen Rippen herangezogen. Dieser Berechnungsdurchgang läuft vor der eigentlichen Plattenbemessung ab und sei hier nur vollständigheitshalber erwähnt.

### 5.6.3 Detailbemessung

Neben den vertikalen Rippen, die zur Standardbeckenstruktur gehören, können auch horizontale Rippen eingefügt werden, um der Beckenstruktur ausreichende Steifigkeit zu verleihen und die Verformungen und Spannungen der Stauhaut sowie der vertikalen Rippen zu reduzieren. Da die Verformungen und Spannungen von der Beckengesamttiefe und den Rippenabständen maßgeblich beeinflusst werden, kann über die Notwendigkeit von horizontalen Rippen grundsätzlich keine Aussage getroffen werden. Ob die Verformungen und die Spannungen der Stauhaut bei beiden Lastniveaus unter den zulässigen Werten zu liegen kommen, ist für jeden Fall neu zu überprüfen. Es kann jedoch gesagt werden, dass bei Beckentiefen mit 2200 mm die Struktur ohne horizontale Rippen kein Auslangen findet. Je nach Rippenabstand verändert sich die Einwirkung auf die Horizontalrippen. Die Einwirkungen werden mit Hilfe der Dachausmittlung bestimmt. Abbildung 67 zeigt die Methode im Detail. Vorab sei erwähnt, dass die Dachausmittlung immer unter einem Winkel von 45° durchgeführt wird, was gleichen Auflagerbedingungen der vertikalen und horizontalen Rippen entspricht. Es wird ein Teil einer Stauhaut dargestellt, wobei in dieser Skizze die blau eingezeichnete Linie der Horizontalrippe entspricht, welche somit die Stauhaut in zwei Platten zerlegt. Betrachtet man jeweils nur die obere Platte, so ergibt sich das Belastungsbild (in der Skizze

mit der Farbe rot gekennzeichnet) entweder zu einem Trapez, falls der Rippenabstand größer als die Plattenlänge ist oder sie ergibt sich zu einem Dreieck, wenn der Rippenabstand kleiner oder gleich der Plattenlänge ist.

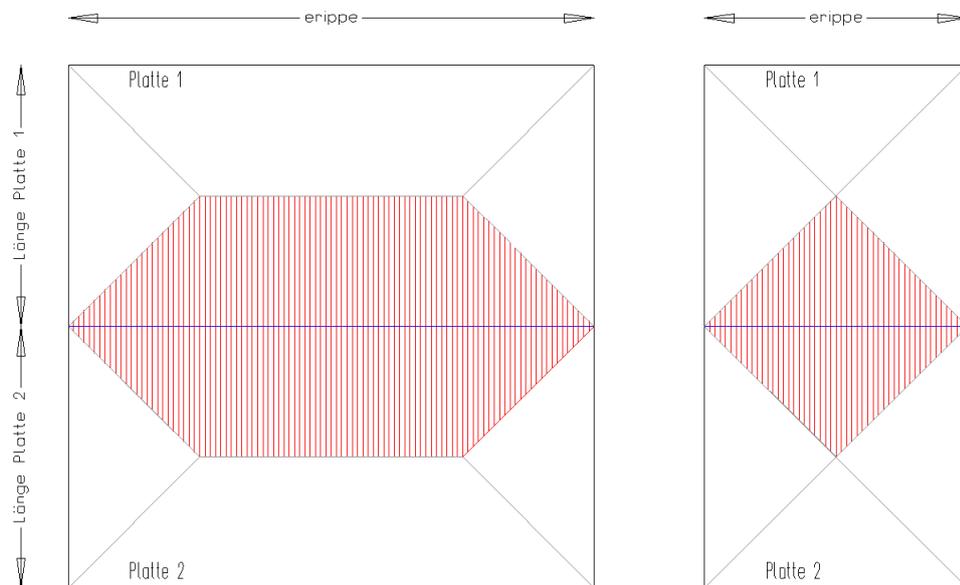


Abbildung 67: Belastungsermittlung der Horizontalrippen mittels Dachausmittlung

Für die Bemessung der Horizontalrippen wird somit entweder eine Trapezbelastung oder eine Dreiecksbelastung aus der Systemrechnung herangezogen, dies hängt von den gegebenen Geometrieabmessungen ab. Die Berechnung erfolgt immer mit den maximal auftretenden Schnittgrößen aus den gegebenen Lastfallkombinationen. Als Querschnitt wurde ein U-Profil mit der Geometrie 60/40/2,5 angenommen. Folgende Annahmen und Überlegungen wurde für die erste Handrechnung getroffen und sollen nun vorgeführt werden. Alle diese Ansätze wurden in das Berechnungsprogramm implementiert. Die Bemessung erfolgt selbstverständlich bei jedem Berechnungsdurchgang aufs Neue. Die Horizontalrippe wurde mit ihrer lichten Breite zwischen den Vertikalrippen angesetzt, d.h., das statische System zur Berechnung gleicht einem Einfeldträger. Weiters wurde eine Beckenstruktur mit Trittstufe gewählt, welche sich in einer Tiefe von 1200 mm befindet. Die angrenzende Platte oberhalb der Trittstufe belüftet sich auf 1200 mm, jene unterhalb der Trittstufe auf 1000 mm. Die Breite der Trittstufe beträgt 100 mm. Es ergibt sich somit eine Gesamtbeckentiefe von 2200 mm. Um die maximale Belastung für eine Horizontalrippe zu erhalten, wurde im Bereich unterhalb der Trittstufe eine Horizontalrippe in Plattenmitte eingefügt, diese erhält somit aufgrund des hydrostatischen Druckes und einer Zuteilung der Last mittels einer Dachausmittlung (vgl. Abbildung 67) eine gemittelte Flächenlast von  $8,5 \text{ KN/m}^2$ . Nach Schneider (2008) ergibt sich bei einer lichten Breite von 650 mm, was einem Rippenabstand von 800 mm entspricht, ein maximales charakteristisches Biegemoment von 0,45 kNm und eine maximale charakteristische Querkraft am Auflager von 2,76 kN. Mit dem Teilsicherheitsbeiwert für Wasser  $\gamma_w = 1,2$  multiplizierten Schnittgrößen für eine Beckentiefe von 2200 mm erfolgte anschließend die Bemessung der Horizontalrippen nach ON EN 1993-1-4: 1996. Es wurde eine Biegebemessung, eine Schubbemessung, ein Beulnachweis über die Abgrenzung des  $c/t$ -Verhältnisses und eine Ausgabe der Verformung der Horizontalrippe durchgeführt. Die Rechnung wurde anschließend mit einer Erddrucklast, die höhere Ausnutzungsgrade ergab, erneut durchgeführt. Da sich bei beiden Berechnungen hohe Ausnutzungsgrade ergaben, wurde zusätzlich eine mitwirkende Breite der Stauhaut in Rechnung gestellt, welche mit einem Grenzwert nach ON EN 1993-1-5: 1996 von  $2 \cdot 15 t_{\text{Stauhaut}}$  (pro Stegseite) begrenzt ist. Das Mit-

einbeziehen der mitwirkenden Breite hat eine zusätzliche Vergrößerung des Widerstandmomentes in den stark beanspruchten, in den zuvor einseitig gestützten Teilen des Querschnittes zur Folge und somit eine Abminderung der auftretenden Spannungen. Die Überführung der Stege von einseitig gestützten Querschnittsteilen in beidseitig gestützte Querschnittsteile durch die kontinuierliche Anordnung der Verbindungsmittel senkt den Ausnutzungsgrad des Beulnachweises. Um die mitwirkende Breite der Stauhaut ansetzen zu dürfen, muss jedoch eine ausreichend gute Verbindung zwischen Horizontalrippe und Stauhaut vorhanden sein. Vor allem bei großen Rippenabständen muss folgende Anordnung der Verbindungsmittel gewählt werden. Die mitwirkende Breite der Stauhaut stellt somit eine Reserve dar und kann bei hohen Ausnutzungsgraden in Rechnung gestellt werden.

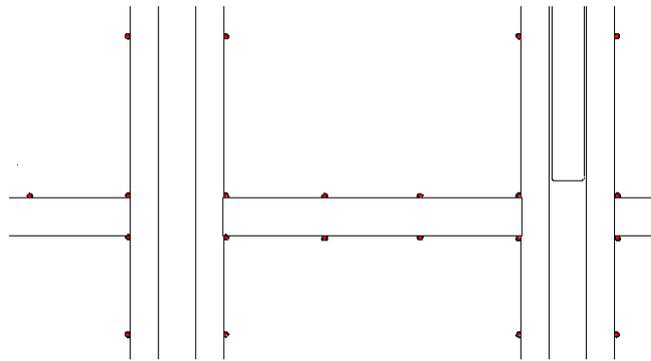


Abbildung 68: Anordnung der Verbindungsmittel

Auf zwei wesentliche Punkte ist beim Ansatz der mitwirkenden Breite jedoch zu achten. Zum einen müssen unbedingt an den Übergangspunkten von horizontalen und vertikalen Rippen in den Eckpunkten Verbindungsmittel gesetzt werden. Dies dient zur Einleitung der Schubkräfte der Horizontalrippen über das Verbindungsmittel in die Stauhaut und in weiterer Folge in die vertikalen Rippen und minimiert das auftretende Knickproblem durch die mehrfache Halterung. Zwischen den Verbindungsmitteln werden die auftretenden Spannungen vermehrt über Biegung des Rippenblechs abgetragen. Die eben erwähnten Erkenntnisse aus der Handrechnung wurden in das *Bemessungstool* implementiert. Der U-Querschnitt mit den Abmessungen 60/40/2,5 kann als Standardquerschnitt für Beckentiefen bis zu 2200 mm herangezogen werden. Bei tieferen Becken bzw. bei größeren Rippenabständen könnte sein, dass der gewählte Querschnitt kein Auslangen mehr findet und müsste durch einen tragfähigeren Querschnitt ersetzt werden.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass ausdrücklich empfohlen wird, die Horizontalrippe so auszuführen, dass die Biegespannung (Stegspannung) ein Maximum von  $55 \text{ N/mm}^2$  nicht überschreitet. Für Horizontalrippenabstände bis 600 mm ist damit ein Vergleichsspannungsnachweis abgedeckt. Dies wird durch die begünstigende Wirkung des Auflagerabstandes ermöglicht, da bei der Berechnung die Auflagerbreite der Horizontalrippe vernachlässigt wird. Der Wert von  $55 \text{ N/mm}^2$  beruht auf einer Annahme, bei welcher die Plattenlänge  $l$  mit der eigentlichen lichten Länge  $l_i$  zwischen den Horizontalrippenstegen in Bezug gebracht wurde. Aus Gleichung (15) ergibt sich die quadratischen Gleichungen (16) und (17) mit der dimensionslosen Unbekannten  $\sigma_y/\sigma_{Rd}$  für den Fall, dass die Platte in  $x$ -Richtung aus der Plattenbiegung zu 100 % ausgenutzt wäre (bezogen auf die Länge  $l$ ).

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y} \leq \sigma_{Rd} \quad (15)$$

$$\sqrt{((\sigma_x \cdot \frac{l_i}{l})^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot (\frac{l_i}{l})^2 \cdot \sigma_y} \leq \sigma_{Rd} \quad (16)$$

$$\sqrt{(\frac{\sigma_x}{\sigma_{Rd}} \cdot (\frac{l_i}{l})^2)^2 + (\frac{\sigma_y}{\sigma_{Rd}})^2 - (\frac{\sigma_y}{\sigma_{Rd}}) \cdot \frac{1}{\sigma_{Rd}} \cdot (\frac{l_i}{l})^2} \leq 1,0 \quad (17)$$

Mit:

- $\sigma_x$       Plattenspannung in x-Richtung in N/mm<sup>2</sup>
- $\sigma_y$       Horizontalrippenspannung in y-Richtung in N/mm<sup>2</sup>
- $\sigma_{Rd}$      Grenzspannung in in N/mm<sup>2</sup>
- $l$             Plattenlänge in mm
- $l_i$           Lichter Abstand zwischen den Horizontalrippenstegen in mm

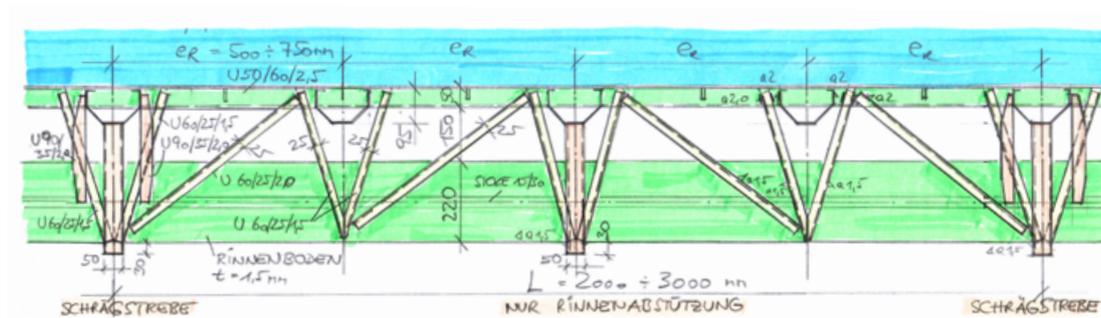
Für die angeführten Plattenlängen und Horizontalrippenbreite ergaben sich folgende Grenzspannungen nach Tabelle(7).

Plattenlängenverhältnis $(l_i/l)^2$	Minimale Spannung $\sigma_y$ im Steg [N/mm <sup>2</sup> ]
$(240/270)^2 = 0,79$	-72,91
$(360/390)^2 = 0,85$	-54,41
$(450/480)^2 = 0,89$	-45,68
$(570/600)^2 = 0,90$	-37,87

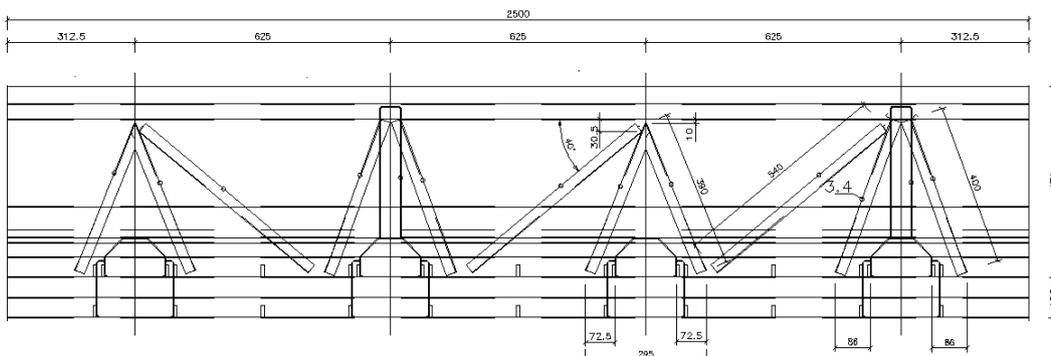
Tabelle 7: Ermittlung des Vergleichsspannungsgrenzwertes für die untersten Horizontalrippen

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten wird somit der Vergleichsspannungsnachweis nicht explizit geführt. Der Wert von 55 N/mm<sup>2</sup> soll als, für übliche Horizontalrippenabstände passender Grenzwert dienen, bei Überschreitung ist ein gesonderter Vergleichsspannungsnachweis zu führen.

Nach den Horizontalrippen wird das Fachwerk bemessen. Das unter der Überlaufrinne liegende Fachwerk dient zur horizontalen Aussteifung und zur Stabilisierung der Rinne sowie zur Einleitung der auftretenden Kräfte, die aus der Rinne resultieren. Dies können Wasserlasten, bei Füllung der Überlaufrinne sein aber auch Verkehrslasten, die den Erddruck um einen konstanten horizontalen Anteil vergrößern. Diese Kräfte werden über das Fachwerk eingeleitet und in die Rippen bzw. Streben in den Baugrund weitergeleitet. Die nachstehenden Abbildungen zeigen den ersten Entwurf des Fachwerks und den Ausführungsplan.



(a) Skizze Fachwerk



(b) Ausführungsplan Fachwerk

Abbildung 69: Fachwerk für Überlaufrinne

Um Aussagen über die Querschnittsabmessungen der Fachwerkstäbe treffen zu können, wurden ebenfalls im Vorfeld mehrere Bemessungen durchgeführt. Als Querschnitt wird ein L-Profil mit den Abmessungen 30/30/2,5 vorgeschlagen. Da sich die Fachwerkgeometrie ändern kann, sie ist vom Rippenabstand von der Rippenbreite und von der Breite der Höhe des Fachwerkträgers abhängig, geht das Bemessungsprogramm bei der Berechnung des Fachwerks folgendermaßen vor. Erneut werden die Schnittgrößen aus der Datei *Systemlösung* bezogen. Diese vereinfacht das tatsächlich vorhandene Fachwerk zur Schnittkraftermittlung in das folgende Rechenmodell, welches in Abbildung 70 ganz unten dargestellt ist.

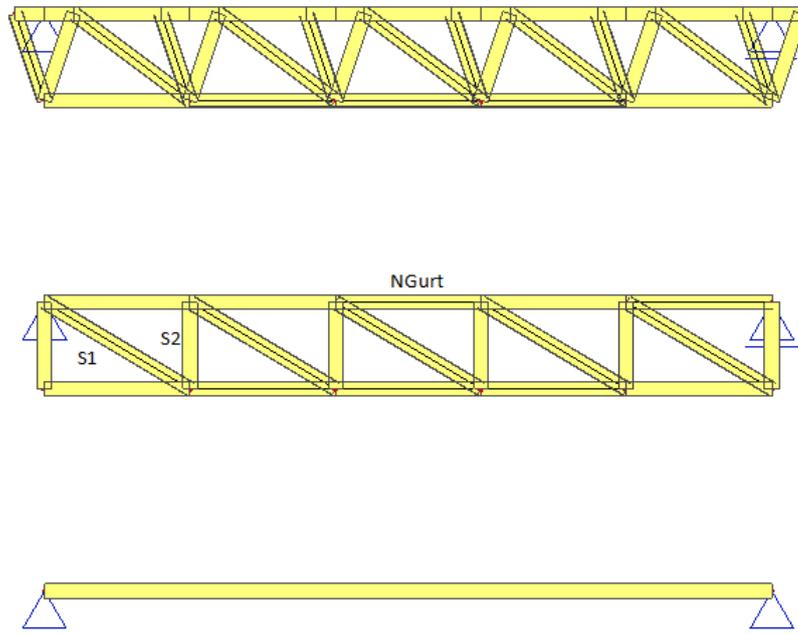


Abbildung 70: Vereinfachtes Rechenmodell für die Fachwerkbemessung

Da sich je nach Anordnung der Abstrebelemente und der Rinnenauflagerungen die Einwirkungen auf das System unterscheiden, werden die Einzellasten gemittelt und im Rippenabstand auf den Einfeldträger aufgetragen. Dies hat ein globales Moment und eine maximal auftretende Auflagerkraft zur Folge, die die Systemberechnung liefert. Mit den vorhandenen Schnittgrößen wird nun die maximal auftretende Gurtkraft mittels einer Abschätzformel, welche auch im Brückenbau häufig zum Einsatz kommt, berechnet. Diese liefert die maximale Gurtkraft im Obergurt des Fachwerkes, indem man das globale Moment durch die Fachwerkhöhe teilt. Im Brückenbau wird diese Methode vor allem für Bogenbrücken im Rahmen einer ersten Vorbemessung verwendet. Man berechnet zuerst das globale maximale Moment des unter dem Bogen liegenden Einfeldträgers und dividiert anschließend das Moment durch den Bogenstich um die horizontale Kraftkomponente im Bogen zu erhalten (Unterweger, 2007). Neben der maximalen Gurtkraft in Fachwerkmitte werden ebenso bei jedem Berechnungsdurchgang zwei weitere Fachwerkstäbe berechnet. Diese konnten aufgrund von Symmetriebedingungen und der gegebenen Geometrie immer als die maximal belasteten Stäbe ausgewiesen werden. In Abbildung 70 werden die beiden Stäbe  $S_1$  und  $S_2$  dargestellt. Um die beiden auftretenden Normalkräfte zu ermitteln, wird sich mit der Methode des Rundschnittes beholfen. Dabei können die einzelnen Fachwerkknoten vom Gesamtsystem mit einem Rundschnitt abgetrennt werden und für sich betrachtet werden. Wie beim Gesamtsystem muss auch für den Rundschnitt das Kräftegleichgewicht gelten. Als Resultat erhält man die beiden unbekannt Normalkräfte in den modellierten Fachwerkstäben. Abbildung 71 zeigt den geführten Rundschnitt zur Bestimmung der Stabkraft  $S_2$ .

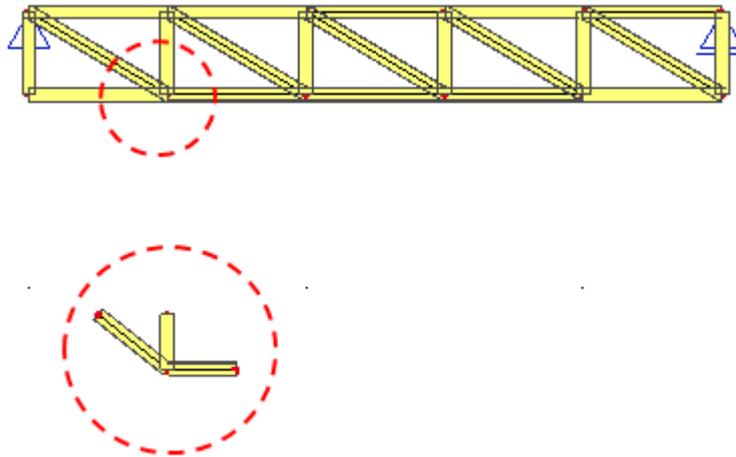


Abbildung 71: Rundschnitt zur Bestimmung der Fachwerkkräfte

Nach der Bestimmung der maximalen Stabkräfte werden für die ermittelten Stäbe Querschnittsnachweise durchgeführt. Diese folgen den Vorgaben des elastisch-elastischen Nachweiskonzeptes. Weiters werden für die druckbeanspruchten Stäbe Stabilitätsnachweise geführt. Die Knicklängen ergeben sich bei den horizontalen Fachwerkstäben zu  $e_{\text{rippe}}$ , beim Fachwerkstab  $S_1$  zur Länge der Diagonalen und beim Fachwerkstab  $S_2$  zur Höhe des Fachwerkes. Die Knicklängen werden somit immer mit der lichten Länge des Fachwerkstabes angesetzt, was einer gelenkigen Lagerung am Anfang und am Ende des Stabes entspricht. Die Bemessung der Anschlussnähte erfolgte exemplarisch außerhalb dieses Dokuments.

### 5.6.4 Rippenbemessung

Nach der Berechnung der Stauhaut und der Details erfolgt die Rippenbemessung. Der User hat die Möglichkeit sich zwischen vier Rippentypen zu entscheiden. Nach der Auswahl des Rippentyps wird der gewählte Typ für die Berechnung herangezogen. Die Abbildungen 72 und 73 zeigen die verfügbaren Rippentypen.

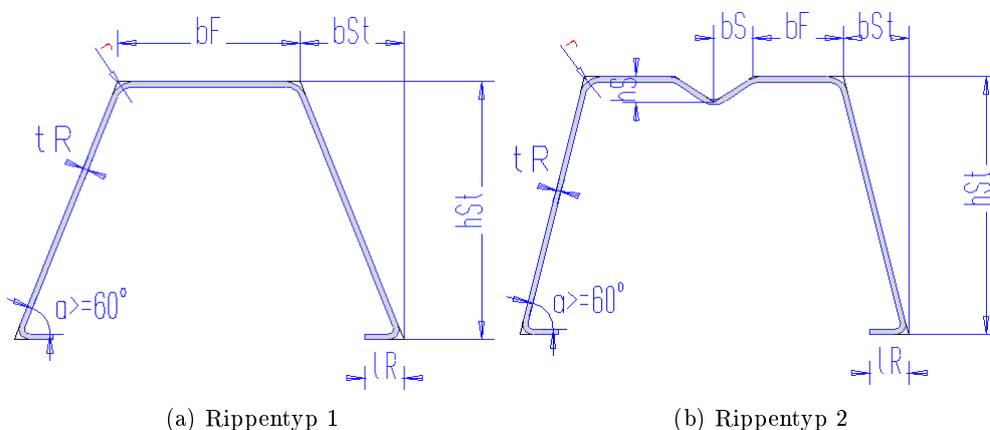


Abbildung 72: Rippentypen I

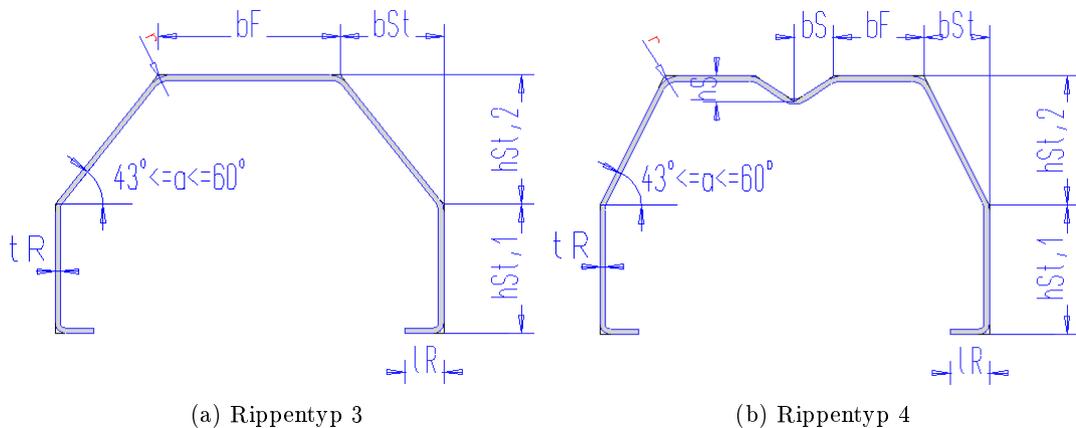


Abbildung 73: Rippentypen II

Mit den berechneten Spannungswerten der Stauhaut, die für die Vergleichsspannung und somit für die Gesamtspannung benötigt werden, erfolgt ein iterativer Prozess für die Beulbemessung der Rippe. Der iterative Prozess wird so lange wiederholt, bis sich beim Spannungsverhältnis  $\psi$ , welches sich aus der Division der beiden Endspannungen eines Querschnittsteiles ergibt, keine Änderung mehr erfolgt. Diese integrierte Excel-Funktion wird ebenso mit Hilfe von VBA definiert und aufgerufen um die Iterationsschritte, die Genauigkeit und die Nebenbedingungen exakt definieren zu können.

### 5.6.5 Darstellung der Ergebnisse

Nach der Bemessung der einzelnen Bauteile des Schwimmbeckens erfolgt die Erstellung der Ergebnisdatei. Hierbei werden alle in der Arbeitsmappe gesammelten und vom User eingegebenen Werte, die Schnittkräfte der Systemrechnung mit ihren Schnittkraftbildern, die elastischen und plastischen Stauhautspannungen, die Stauhautverformungen, die Rippenbemessung und die Detailbemessungen dargestellt. Ein großes Anliegen an die Darstellung der Ergebnisse stellte die automatisierte Umwandlung der Excel Datei in das Dateiformat *PDF*<sup>15</sup> dar. Die Ergebnisse werden somit in einer plattformunabhängigen Dateiformat ausgegeben und können somit vom User nicht verändert werden. Der User hat die Möglichkeit, sich zwischen zwei Ausgabedateien zu entscheiden. Die Datei *Ergebnisse* ist die ausführliche Version mit allen Schnittkraftbildern der Systemlösungen. Der Nachteil dieser Datei ist jedoch, dass die Konvertierung in das Dateiformat *PDF* einige Minuten in Anspruch nimmt, da die Schnittkraftdiagramme die Größe der Datei wesentlich steigern. Wählt der User die zweite Ausgabedatei, sie trägt den Namen *Ergebnisse\_Kurzfassung*, so kann die Erstellung der Datei erheblich schneller erfolgen, da die Schnittkraftdiagramme in dieser Version nicht angeführt sind. Alle anderen Ergebnisse sind auch in dieser Datei aufgelistet. Die Erstellung dieser Datei dauert nur wenige Sekunden.

### 5.6.6 Schutzmechanismus

Um das Bemessungsprogramm vor unbeabsichtigten Änderungen des Users zu schützen, bedarf es eines Schutzmechanismus. Auf die Maßnahmen, die verhindern sollen, dass Quellcode oder Formeln durch den Benutzer geändert werden, wird in den folgenden Ausführungen eingegangen.

<sup>15</sup>PDF = Portable Document Format

- Um das Programm starten zu können, benötigt der User die Kenntnis über das Passwort, welches am Startbildschirm verlangt wird. Ohne dieses Passwort kann der Benutzer das *Bemessungstool* nicht starten. Alle anderen Arbeitsmappen sind ebenfalls mit einem Passwort geschützt. Somit hat der User auch keine Möglichkeit die einzelnen Arbeitsmappen zu modifizieren, wenn das Programm nicht läuft.
- Der wohl wirksamste Schutzmechanismus ist, dass das Bemessungsprogramm so aufgebaut ist, dass der User zu keiner Zeit der Eingabe der Werte in die verschiedenen Tabellen einsieht. Er sieht lediglich die Userformen, über welche er seine Eingaben tätigt. Die Userform schützt sozusagen die hinter ihr liegende Arbeitsmappe.
- Bei der Eingabe tritt ein weiterer Schutzmechanismus in Kraft. Dieser kontrolliert die eingegebenen Werte auf ihre Richtigkeit. Es werden nur numerische Werte, welche in den meisten Fällen größer als Null sind, zugelassen. Für die Eingabe der Lasten, um ein Beispiel zu nennen, wird der Wert null ebenfalls erlaubt. Darf eine Eingabe nicht den Wert null annehmen oder ist sie nicht numerisch, so erscheint folgende Fehlermeldung (vgl. Abbildung 74). Weiters werden einige Eingaben beschränkt, um der Berechnung keine ungültigen Werte für die Berechnung zu liefern, sodass ein fehlerfreier Rechenvorgang gemäß der gültigen Europäischen Baunormen (Eurocodes) garantiert werden kann.



Abbildung 74: Fehlermeldungen

- Ein weiterer Schutzmechanismus ist das Ausschalten des auf jeder Userform automatisch generierten Buttons zum Beenden der Userform. Dieser Button befindet sich rechts oben auf jeder Userform und ist mit einem X gekennzeichnet. Folgender VBA Code stellt sicher, dass diese Funktion ausgeschaltet ist.

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
'Deaktivieren des Close Buttons
Cancel = Not CloseMode
End Sub
```

Abbildung 75: VBA Code zum Deaktivieren der Schließfunktion

- Auch der Abbruch mit der ESC-Taste, welcher normalerweise zu jedem Zeitpunkt der Eingabe oder der Berechnung möglich ist, wurde mit einer VBA Anweisung deaktiviert. Dies ist von Nöten um alle Arbeitsmappen bei einem unvorhergesehenen Abbruch zu schützen, da der User in diesem Fall den Zugang zu allen in diesem Moment geöffneten Arbeitsmappen hätte.

- Nach den Eingaben der Werte startet der User die Berechnung. Auch bei der Berechnung sieht der User eine Userform im Vordergrund, welche ihm den Fortschritt der Berechnung anzeigt, er hat keine Möglichkeit, in die Tabellenblätter in denen die Berechnung vonstatten geht, Veränderungen vorzunehmen.
- Nach der Bemessung der Bauteile werden alle zur Berechnung benötigten Arbeitsblätter wieder geschlossen und gespeichert. Dies erlaubt dem Benutzer das Nachvollziehen aller Berechnungen.

Es sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sämtliche Schutzmechanismen lediglich dazu dienen, um unbeabsichtigte Änderungen des Benutzers zu vermeiden. Mit Kenntnis der Passwörter können die Schutzmechanismen deaktiviert werden und geben dem User somit die Möglichkeit Modifizierungen durchzuführen.

## 6 Bemessung

### 6.1 Bemessungsgrundlagen

Die Berechnung der Stauhaut und der Detailpunkte wurde basierend auf folgenden Normen durchgeführt:

- ÖNORM EN 1990
- ÖNORM EN 1991-4
- ÖNORM B 1991-4
- ÖNORM EN 1993-1-1
- ÖNORM EN 1993-1-4
- ÖNORM EN 1993-1-5

Nach ON EN 1990: 1996 gilt sowohl für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit folgendes Sicherheitskonzept,

$$E_d \leq R_d \quad (18)$$

$$\gamma_F \cdot E_k \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (19)$$

wobei  $E_k$  die charakteristischen Werte der Schnittgrößen,  $R_k$  die charakteristischen Werte des Widerstandes bzw.  $E_d$  die Bemessungswerte der Einwirkungen und  $R_d$  die Bemessungswerte des Widerstandes sind. Der Teilsicherheitsbeiwert auf der Seite der Einwirkung lautet  $\gamma_F$  und  $\gamma_M$  behaftet den Widerstand mit einer Teilsicherheit.

Um den Bemessungswert der Einwirkung zu erhalten, sind sämtliche Lastfallkombinationen nach ON EN 1990: 1996 zu überprüfen. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt folgende Kombinationsregel:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} (\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}) + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{1 > 1} (\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) \quad (20)$$

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nach Eurocode folgende Kombinationsregel zu befolgen, welche die charakteristische (seltene) Einwirkungskombination angibt:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{1 > 1} (\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) \quad (21)$$

Folgende Kombinationsbeiwerte werden nach ON EN 1993-1-4: 1996 für Schüttgüter und weitere Belastungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit nach Gleichung (20) vorgeschlagen:

Kurzbezeichnung	Bemessungssituation / vorherrschende Einwirkung	Ständige Einwirkungen		Leitende veränderliche Einwirkung		Unabhängige veränderliche Einwirkung 1 (Haupt-)		Unabhängige veränderliche Einwirkung 2		Unabhängige veränderliche Einwirkung 3, 4, usw.	
		Beschreibung	$\xi_1$	(siehe nächste Spalte, "Haupt-")		Beschreibung	$\psi_{0,1}$	Beschreibung	$\psi_{0,2}$	Beschreibung	$\psi_{0,3}$ $\psi_{0,4}$ etc
D	Schüttgutentleerung	Eigen-gewicht	0,9			Schüttgutentleerung (voller Silo)	1,0	Fundamentsetzungen	0,7	Schnee , Wind, Temperatur	0,6
										Nutzlasten oder Verformungen	0,7
I	Eingeprägte Verformungen	Eigen-gewicht	0,9			Schüttgut-füllung (Silo voll gefüllt)	1,0	Eingeprägte Verformungen	0,7	Schnee , Wind, Temperatur	0,6
										Nutzlasten	0,7
S	Schnee	Eigen-gewicht	0,9			Schüttgut-füllung (Silo voll)	1,0	Schnee	0,6	Nutzlasten	0,7
WF	Wind und gefüllter Silo	Eigen-gewicht	0,9			Schüttgut-füllung, Silo voll gefüllt	1,0	Wind	0,6	Nutzlasten	0,7
WE	Wind und leerer Silo	Eigen-gewicht	0,9			Kein Schüttgut im Silo	0,0	Wind	0,6	Nutzlasten	0,7
T	Temperatur	Eigen-gewicht	0,9			Schüttgut-füllung (Silo voll)	1,0	Temperatur	0,6	Nutzlasten	0,7

**ANMERKUNG** Tabelle A.2 sollte unter Verwendung der Gleichungen (6.10a) und (6.10b) von EN 1990, 6.4.3.2 verwendet werden.

Abbildung 76: Kombinationsbeiwerte nach ON EN 1991-4: 1996 für ULS (Tabelle A.2)

Das Normenkonzept gemäß ON EN 1993-1-1: 1996 bietet vier verschiedene Nachweisverfahren. Abbildung 77 zeigt die vier Verfahren im Überblick.

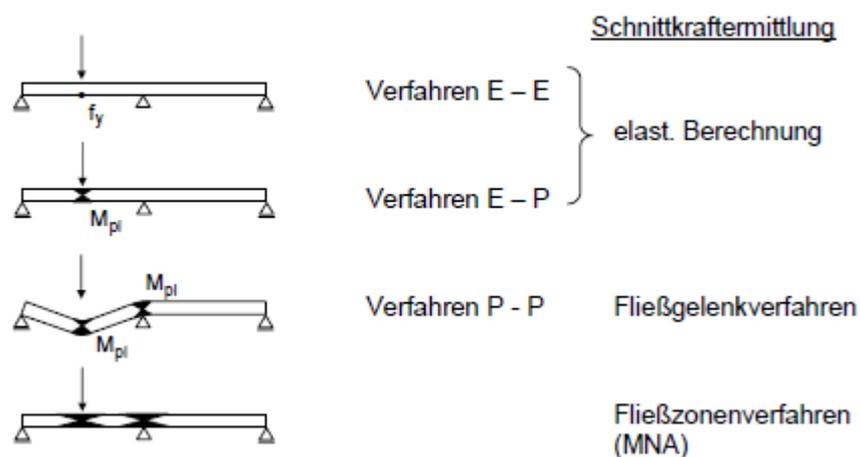


Abbildung 77: Berechnungsverfahren

Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich ob die Schnittkraftermittlung und/oder die Querschnittsausnutzung entweder elastisch (E) oder plastisch (P) durchgeführt wird. Um eine Zuordnung zum Berechnungsverfahren treffen zu können und um die Beanspruchbarkeit und Rotationsfähigkeit, welche durch lokales Beulen beschränkt ist, festzustellen, werden die Querschnitte nach ON EN 1993-1-1: 1996 in vier Querschnittsklassen eingeteilt.

- Querschnitte der Klasse 1 sind in der Lage plastische Gelenke oder Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastische Berechnung auszubilden.
- Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, ihre Rotationskapazität ist jedoch aufgrund von örtlichem Beulen begrenzt.
- Querschnitte der Klasse 3 sind solche, die für eine elastische Spannungsverteilung die Fließgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser erreichen, sie können aber wegen örtlichen Beulens die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln;
- Querschnitte der Klasse 4 weisen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auf.

Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung der Querschnittsklassen mit ihrer Spannungsverteilung anhand eines I-Profiles.

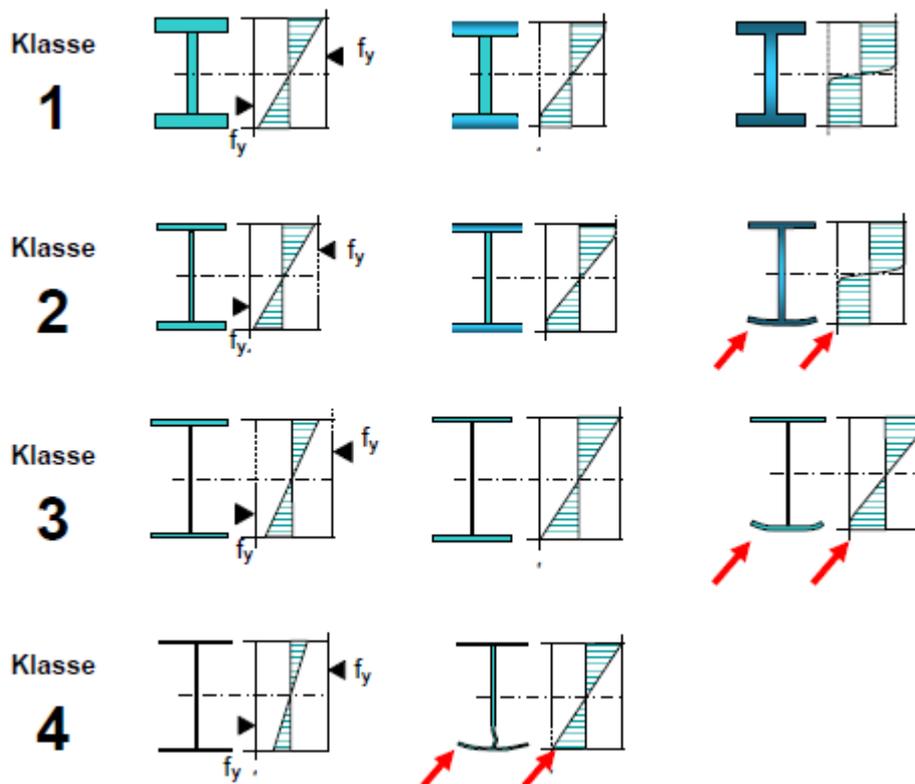


Abbildung 78: Querschnittsklassen (Richard Greiner, 2005)

Die Einteilung in die jeweiligen Querschnittsklassen erfolgt anhand des  $c/t$ -Verhältnisses. Die folgenden Abbildungen geben die Erklärungen für das  $c/t$ -Verhältnis der verschiedenen Querschnitte

und zeigen die maximalen  $c/t$ -Verhältnisse für beidseitig gestützte Querschnittsteile, für einseitig gestützte Querschnittsteile und für Winkelprofile.

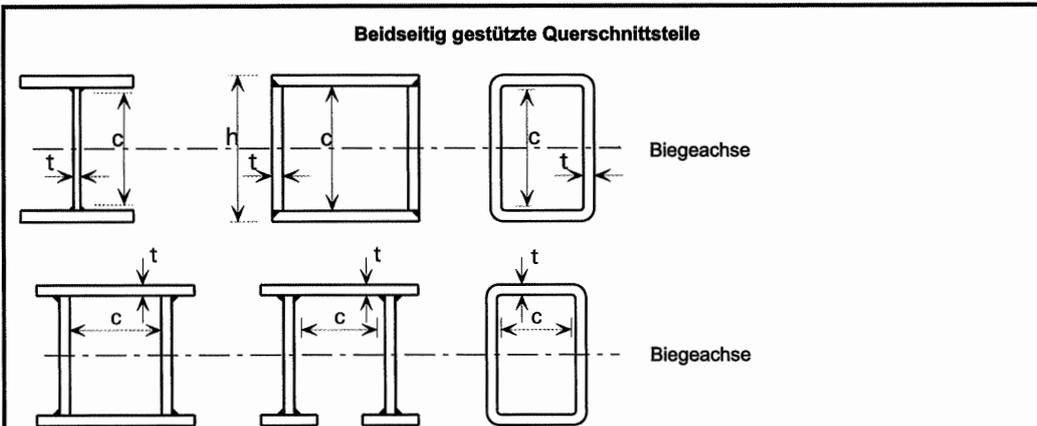
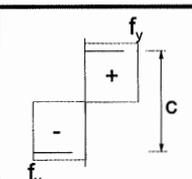
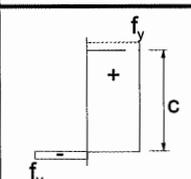
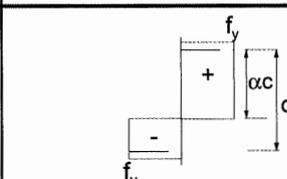
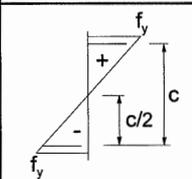
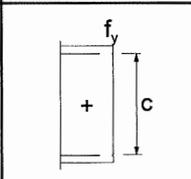
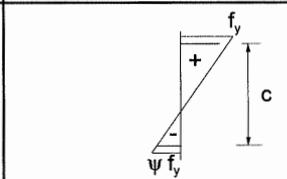
<b>Beidseitig gestützte Querschnittsteile</b>				
				
Klasse	biegebeanspruchtes Querschnittsteil	druckbeanspruchtes Querschnittsteil	druck- und biegebeanspruchtes Querschnittsteil	
Spannungsverteilung im Querschnittsteil (Druck positiv)				
1	$clt \leq 56,0\varepsilon$	$clt \leq 25,7\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$ : $clt \leq \frac{308\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$ : $clt \leq \frac{28\varepsilon}{\alpha}$	
2	$clt \leq 58,2\varepsilon$	$clt \leq 26,7\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$ : $clt \leq \frac{320\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$ : $clt \leq \frac{29,1\varepsilon}{\alpha}$	
Spannungsverteilung im Querschnittsteil (Druck positiv)				
3	$clt \leq 74,8\varepsilon$	$clt \leq 30,7\varepsilon$	$clt \leq 15,3\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$ Zu $k_\sigma$ siehe EN 1993-1-5	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
ANMERKUNG Bei Hohlprofilen darf auf der sicheren Seite liegend $c = (h - 2t)$ oder $(b - 2t)$ gesetzt werden.				

Abbildung 79: Maximale  $c/t$ -Verhältnisse für beidseitig gestützte Querschnittsteile (ON EN 1993-1-4: 1996)

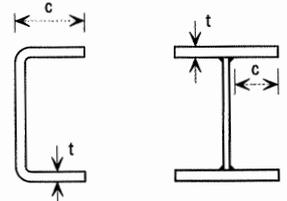
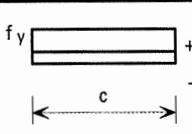
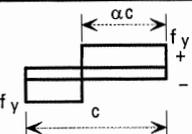
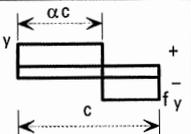
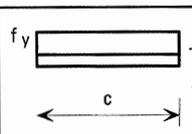
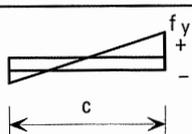
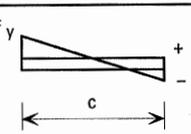
Einseitig gestützte Querschnittsteile				
Klasse	Querschnittsart	druckbeanspruchtes Querschnittsteil	druck- und biegebeanspruchtes Querschnittsteil	
			druckbeanspruchter Rand	zugbeanspruchter Rand
				
Spannungsverteilung im Querschnittsteil (Druck positiv)				
1	kaltgeformt	$clt \leq 10\varepsilon$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	geschweißt	$clt \leq 9\varepsilon$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	kaltgeformt	$clt \leq 10,4\varepsilon$	$clt \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	geschweißt	$clt \leq 9,4\varepsilon$	$clt \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Spannungsverteilung im Querschnittsteil (Druck positiv)				
3	kaltgeformt	$clt \leq 11,9\varepsilon$	$clt \leq 18,1\varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}$ Zu $k_{\sigma}$ siehe EN 1993-1-5	
	geschweißt	$clt \leq 11\varepsilon$	$clt \leq 16,7\varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}$ Zu $k_{\sigma}$ siehe EN 1993-1-5	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698

Abbildung 80: Maximale c/t-Verhältnisse für einseitig gestützte Querschnittsteile (ON EN 1993-1-4: 1996)

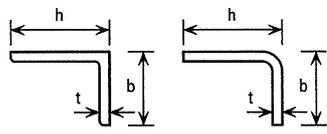
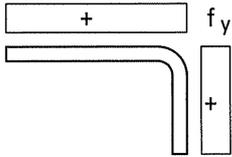
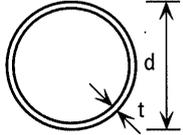
<b>Winkel</b>			
Siehe auch unter „einseitig gestützte Querschnittsteile“ (Blatt 2 von 3)			
Klasse	druckbeanspruchter Querschnitt		
Spannungsverteilung über den Querschnitt (Druck positiv)			
3	$h t \leq 11,9 \varepsilon ; \frac{b+h}{2 t} \leq 9,1 \varepsilon$		
<b>Rundhohlprofile</b>			
			
Klasse	biegebeanspruchter Querschnitt bis 240 CHS	druckbeanspruchter Querschnitt	
1	$d t \leq 50 \varepsilon^2$	$d t \leq 50 \varepsilon^2$	
2	$d t \leq 70 \varepsilon^2$	$d t \leq 70 \varepsilon^2$	
3	$d t \leq 280 \varepsilon^2$	$d t \leq 90 \varepsilon^2$	
	ANMERKUNG Zu $d > 240$ mm und $d t > 280 \varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6.	ANMERKUNG Zu $d t > 90 \varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6.	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401      1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220      460
	$\varepsilon$	1,03	1,01      0,698

Abbildung 81: Maximale c/t-Verhältnisse für Winkelprofile (ON EN 1993-1-4: 1996)

Folgende Nachweise werden für die Stauhaut bzw. für die Detailbemessung durchgeführt.

## 6.2 Normalspannung

Für den Nachweis der Normalspannung ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd} \quad [N/mm^2] \quad (22)$$

$$\frac{N_{Ed}}{A} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [N/mm^2] \quad (23)$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [N/mm^2] \quad (24)$$

Mit:	
$\sigma_{Ed}$	Bemessungswert der Normalspannung in $N/mm^2$
$\sigma_{Rd}$	Grenznormalspannung in $N/mm^2$
$N_{Ed}$	Bemessungswert der Normalkraft in N
$A$	Querschnittsfläche in $mm^2$
$f_y$	Streckgrenze in $N/mm^2$
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert
$A_{eff}$	Effektive Querschnittsfläche in $mm^2$
$\gamma_{M1}$	Teilsicherheitsbeiwert

### 6.3 Biegespannung

Analog zur Normalspannung ergeben sich folgende Gleichungen für den Biegespannungsnachweis:

$$\sigma_{Ed} \leq \sigma_{Rd} \quad [N/mm^2] \quad (25)$$

$$\frac{M_{Ed}}{W} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [N/mm^2] \quad (26)$$

$$\frac{M_{Ed}}{W_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad [N/mm^2] \quad (27)$$

Mit:	
$M_{Ed}$	Bemessungswert des Biegemomentes in Nmm
$W$	Widerstandsmoment in $mm^3$
$f_y$	Streckgrenze in $N/mm^2$
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert
$W_{eff}$	Effektives Widerstandsmoment in $mm^3$
$\gamma_{M1}$	Teilsicherheitsbeiwert

### 6.4 Schubspannung

Für den Nachweis der Schubspannungen gelten die nachstehenden Gleichungen.

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \quad [N/mm^2] \quad (28)$$

$$\frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad [N/mm^2] \quad (29)$$

$$\frac{V_{Ed} \cdot S_{eff}}{I_{eff} \cdot t} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad [N/mm^2] \quad (30)$$

Mit:	
$\tau_{Ed}$	Bemessungswert der Schubspannung in $N/mm^2$
$\tau_{Rd}$	Grenzscherubspannung in $N/mm^2$
$V_{Ed}$	Bemessungswert der Querkraft in N
$S$	Statisches Moment in $mm^3$
$I$	Trägheitsmoment in $mm^4$
$t$	Querschnittsdicke in mm
$S_{eff}$	Effektives Statisches Moment in $mm^3$
$I_{eff}$	Effektives Trägheitsmoment in $mm^4$

## 6.5 Vergleichsspannung

Bei Interaktion von Biegespannungen und Schubspannungen müssen folgende Vergleichsspannungsnachweise geführt werden:

$$\sigma_{V,Ed} \leq \sigma_{Rd} \quad [N/mm^2] \quad (31)$$

$$\sqrt{\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [N/mm^2] \quad (32)$$

$$\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{y,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{y,Ed} - 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad [N/mm^2] \quad (33)$$

## 6.6 Beulen

Um sicher zu gehen, dass ein Querschnitt nicht beulgefährdet ist, muss folgende Gleichung gelten. Der Grenzwert  $\frac{c}{t_{grenz}}$  wurde mit Hilfe der "Methode der reduzierten Spannungen" ermittelt.

$$\frac{c}{t} \leq \frac{c}{t_{grenz}} \quad [-] \quad (34)$$

## 6.7 Verformung

Die Verformungen werden lediglich ausgewiesen. Es erfolgt kein Vergleich mit einer maximal zulässigen Verformung. Dies ist vom User je nach Vorgaben des Bauherrn festzulegen.

## 6.8 Stauhaut

Für die Stauhautbemessung wurden folgende zwei Nachweisverfahren untersucht. Tabelle 8 zeigt die beiden Nachweisverfahren nach ON EN 1993-1-1: 1996 im Vergleich nach.

Nachweisverfahren	Tragwerksberechnung	Bauteilwiderstand
E-E	elastisch	elastisch
E-P	elastisch	plastisch

Tabelle 8: Nachweisverfahren

Nach dem Verfahren E-E wurden auf ULS-Niveau Spannungsnachweise und auf SLS-Niveau Verformungsnachweise geführt. Zusätzlich zu den Verformungsnachweisen wurde auf SLS-Niveau auch Spannungsnachweise geführt, um sicher zu gehen, dass es unter Gebrauchslastniveau zu keiner plastischen Ausnutzung kommt. Ohne diese Spannungsnachweise könnte es zu dauerhaften plastischen Verformungen kommen, was es dringlichst zu vermeiden gilt.

### 6.8.1 E-P Nachweis der Tragsicherheit

Beim elastisch-plastischen Tragsicherheitsnachweis erfolgt die Schnittkraftermittlung elastisch und die Spannungsausnutzung wird plastisch ermittelt. Folgende Teilsicherheitsbeiwerte werden für den Tragsicherheitsnachweis bei der Berechnung auf der Belastungsseite berücksichtigt:

- $\gamma_F = 1,35$  für ständige Eigenlasten der Edelstahlkonstruktion und den aktiven Erddruck
- $\gamma_F = 1,50$  für veränderliche Verkehrslasten
- $\gamma_F = 1,20$  für den hydrostatischen Druck
- $\gamma_F = 1,00$  für den Erdruchdruck

Die folgende Abbildung zeigt einen Auszug aus ON EN 1993-1-4: 1996. Daraus leiten sich die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Materialseite ab.

Querschnittstragfähigkeit gegenüber ausgeprägtem Fließen einschließlich lokaler Instabilitäten	$\gamma_{M0}$
Bauteiltragfähigkeit gegenüber Instabilitäten entsprechend Bauteilnachweisen	$\gamma_{M1}$
Querschnittstragfähigkeit gegenüber Zugbruch	$\gamma_{M2}$
Beanspruchbarkeit von Schrauben, Nieten, Schweißnähten, Bolzen und Blechen mit Lochleibungsbeanspruchung	$\gamma_{M2}$

Abbildung 82: Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  nach ON EN 1993-1-4: 1996

Folgende Werte sind laut ON EN 1993-1-4: 1996 für die Berechnung vorgesehen:

- $\gamma_{M0} = 1,10$
- $\gamma_{M1} = 1,10$
- $\gamma_{M2} = 1,25$

Als Elastizitätsmodul wird stets der Mittelwert des E-Moduls als Beziehung zwischen Spannung und Dehnung eingesetzt. Somit ergibt sich beim Spannungsnachweis ein Widerstandsmoment für die Stauhaut von  $W = \frac{t^2}{4}$ .

### 6.8.2 E-E Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Beim elastisch-elastischen Gebrauchstauglichkeitsnachweis erfolgt die Schnittkraftermittlung elastisch und die Verformung sowie die Spannungsausnutzung wird ebenso elastisch ermittelt. Der Teilsicherheitsbeiwert für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird auf der Belastungsseite stets mit  $\gamma_F = 1,00$  berücksichtigt. Die Materialseite ist ebenso mit einem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_M = 1,00$  bestückt. Wie bei der elastisch-plastischen Berechnung fließt stets der Mittelwert des E-Moduls in die Berechnung ein. Das Widerstandsmoment für den Spannungsnachweis ergibt sich zu  $W = \frac{t^2}{6}$ . Dieses Sicherheitskonzept soll ausschließen, dass die Fließspannung unter Gebrauchslast erreicht wird, Schweißeigenspannungen sind davon ausgenommen. Es werden die lokalen und globalen Verformungen ausgegeben.

## 6.9 Detailbemessung

Für die Bemessung der Horizontalrippen und der Fachwerkstäbe wurde lediglich das E-E Nachweisverfahren nach den oben angeführten Gleichungen herangezogen. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die beiden Traglastniveaus auf der Einwirkungsseite und auf der Materialseite entsprechen jenen der Stauhautbemessung.

## 7 Schlussfolgerung

In dieser Masterarbeit wurde ein Bemessungsprogramm für Edelstahlschwimmbecken in Zusammenarbeit mit der Firma Berndorf Bäderbau entwickelt. Der Benutzer hat die Möglichkeit alle bis auf wenige, aus konstruktiven Überlegung getroffenen Festlegungen, Eingabeparameter bezüglich Geometrie, Material und Belastungen selbst zu bestimmen. Der Bemessungsumfang beinhaltet das Stauhautblech, die vertikalen und horizontalen Rippen, Abstreben, die Überlaufrinne sowie das Fachwerk zur Sicherung der Überlaufrinne. Weiters beinhaltet das Programm eine übersichtliche Ergebnisdarstellung aller Eingabeparameter, Lastfallkombinationen und Nachweise.

Aufgrund dieser Arbeit kann folgender Schluss gezogen werden. Die Plattenberechnung mittels FE-Vorstudie bot eine optimale Lösungsmöglichkeit um die auftretenden Plattengrößen realitätsnah zu ermitteln. Die Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die gewählte Methode für beliebige Plattengeometrien bei gleichen Auflagerbedingungen zutreffende Ergebnisse liefert.

Die Detailbemessungen sind nachvollziehbar durchgeführt worden und sämtliche zur Bemessung getätigte Annahmen sind deutlich formuliert und beruhen auf ingenieurmäßigen Vereinfachungen, welche stets auf der sicheren Seite zu liegen kommen. Somit wurden Standardlösungen für die Horizontalrippe und die Fachwerkstäbe zur Verfügung gestellt.

Die benutzerfreundliche Eingabemaske gibt dem Benutzer eine klare Struktur vor und führt ihn durch die einzelnen Eingabeschritte. Durch die automatisierten Überprüfungsmechanismen werden Fehlerquellen bei der Eingabe minimiert und ein reibungsloser Ablauf der Berechnung garantiert. Die Bemessung der gesamten Beckenstruktur wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt, um dem Benutzer die Ergebnisse auf beiden Lastniveaus die Ergebnisse präsentieren zu können.

Die vorliegenden Musterlösungen bieten eine Hilfestellung und geben Richtwerte für zukünftige Berechnungen an. Die Orientierung an diesen Lösungen wird empfohlen.

## Abbildungsverzeichnis

1	Bisherige Beckengeometrie ohne Trittstufe . . . . .	3
2	Neu entwickelte Beckengeometrie mit Trittstufe . . . . .	4
3	Bauteile der Beckenstruktur . . . . .	5
4	Bezeichnung der Stauhautelemente . . . . .	7
5	Auflagerbedingungen der Einzelplatten . . . . .	8
6	Lastfälle für die Plattenberechnung . . . . .	9
7	Verformungen $U_z$ für Seitenverhältnis $a/b = 0,5$ . . . . .	11
8	Grundspannungen $\sigma_x$ für Seitenverhältnis $a/b = 0,5$ . . . . .	12
9	Grundspannungen $\sigma_y$ für Seitenverhältnis $a/b = 0,5$ . . . . .	13
10	Verformungen $U_z$ für Seitenverhältnis $a/b = 2,0$ . . . . .	14
11	Grundspannungen $\sigma_x$ für Seitenverhältnis $a/b = 2,0$ . . . . .	15
12	Grundspannungen $\sigma_y$ für Seitenverhältnis $a/b = 2,0$ . . . . .	16
13	Ergebnisse der FE-Berechnung für $a/b = 0,5$ und $a/b = 2,0$ mit $l_i/a = 0,9$ . . . . .	17
14	Vergleich der Ergebnisse von FE-Berechnung mit analytischen Lösungen . . . . .	18
15	Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit $a/b = 0,5$ . . . . .	22
16	Werte der Vergleichsrechnung für $a/b = 0,5$ . . . . .	22
17	Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit $a/b = 1,0$ . . . . .	23
18	Werte der Vergleichsrechnung für $a/b = 1,0$ . . . . .	23
19	Vergleich der Ergebnisse einer Einzelplatte mit $a/b = 2,0$ . . . . .	24
20	Werte der Vergleichsrechnung für $a/b = 2,0$ . . . . .	24
21	Stauhautvergleichsrechnung ohne horizontale Rippen . . . . .	26
22	Verformung $U_z$ für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen . . . . .	26
23	Grundspannungen für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen . . . . .	27
24	Werte der Vergleichsrechnung für eine Stauhaut ohne horizontale Rippen . . . . .	28
25	Stauhautvergleichsrechnung mit horizontalen Rippen . . . . .	29
26	Verformung $U_z$ für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen . . . . .	29
27	Grundspannungen für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen . . . . .	30
28	Werte der Vergleichsrechnung für eine Stauhaut mit horizontalen Rippen . . . . .	31
29	Verformungsvergleich Durchlaufträger mit kurzem Mittelfeld und Einfeldträger (überhöht dargestellt) . . . . .	33
30	FE-Modell Überlaufrinne . . . . .	34
31	Randbedingungen Überlaufrinne . . . . .	35
32	Lasten für die Überlaufrinne I . . . . .	36
33	Lasten für die Überlaufrinne II . . . . .	37
34	Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 1 . . . . .	39
35	Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 2 . . . . .	40
36	Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 3 . . . . .	41
37	Hauptvergleichsspannungen aufgrund von ULS LFK 4 . . . . .	42
38	Normalkräfte $n$ aufgrund von ULS LFK 1 . . . . .	43
39	Normalkräfte $n$ aufgrund von ULS LFK 2 . . . . .	44
40	Normalkräfte $n$ aufgrund von ULS LFK 3 . . . . .	45
41	Normalkräfte $n$ aufgrund von ULS LFK 4 . . . . .	46
42	Momente $m$ aufgrund von ULS LFK 1 . . . . .	47
43	Momente $m$ aufgrund von ULS LFK 2 . . . . .	48
44	Momente $m$ aufgrund von ULS LFK 3 . . . . .	49
45	Momente $m$ aufgrund von ULS LFK 4 . . . . .	50
46	ULS Ergebnisse Vergleichsspannungen und Schnittgrößen der Überlaufrinne . . . . .	51
47	Verformungen $U$ aufgrund von SLS LFK 5 . . . . .	52
48	Verformungen $U$ aufgrund von SLS LFK 6 . . . . .	53
49	Verformungen $U$ aufgrund von SLS LFK 7 . . . . .	54

50	SLS Ergebnisse Verformungen der Überlaufrinne . . . . .	55
51	Vergleichsspannungen der Überlaufrinne nach Th.I.O. und Th.II.O. im Vergleich . . . . .	56
52	Objekte der Arbeitsmappe <i>Bemessungstool</i> . . . . .	59
53	Stauhautskizze <i>Tabelle 10</i> . . . . .	60
54	<i>Userform03_Stauhaut</i> . . . . .	62
55	<i>Userform07_Strebe</i> . . . . .	62
56	Prozedur <i>Userform_Initialize</i> . . . . .	63
57	Prozedur <i>Weiter</i> . . . . .	64
58	Prozedur <i>Zurück</i> . . . . .	64
59	Prozedur <i>Werte löschen</i> . . . . .	65
60	Prozedur <i>Programm Beenden</i> . . . . .	65
61	Dialogfelder . . . . .	65
62	Berechnungsablauf . . . . .	68
63	Statisches System Freibad inklusive Aufbeton . . . . .	68
64	Statisches System Freibad exklusive Aufbeton . . . . .	69
65	Statisches System Hallenbad inklusive Aufbeton . . . . .	69
66	Unterschied zwischen FE-Modell und tatsächlicher Lagerbedingung bei Ermittlung der Stützspannungen . . . . .	74
67	Belastungsermittlung der Horizontalrippen mittels Dachausmittlung . . . . .	75
68	Anordnung der Verbindungsmittel . . . . .	76
69	Fachwerk für Überlaufrinne . . . . .	78
70	Vereinfachtes Rechenmodell für die Fachwerkbemessung . . . . .	79
71	Rundschnitt zur Bestimmung der Fachwerkkräfte . . . . .	80
72	Rippentypen I . . . . .	80
73	Rippentypen II . . . . .	81
74	Fehlermeldungen . . . . .	82
75	VBA Code zum Deaktivieren der Schließfunktion . . . . .	82
76	Kombinationsbeiwerte nach ON EN 1991-4: 1996 für ULS (Tabelle A.2) . . . . .	85
77	Berechnungsverfahren . . . . .	85
78	Querschnittsklassen (Richard Greiner, 2005) . . . . .	86
79	Maximale $c/t$ -Verhältnisse für beidseitig gestützte Querschnittsteile (ON EN 1993-1-4: 1996) . . . . .	87
80	Maximale $c/t$ -Verhältnisse für einseitig gestützte Querschnittsteile (ON EN 1993-1-4: 1996) . . . . .	88
81	Maximale $c/t$ -Verhältnisse für Winkelprofile (ON EN 1993-1-4: 1996) . . . . .	89
82	Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_M$ nach ON EN 1993-1-4: 1996 . . . . .	92

## Tabellenverzeichnis

1	Materialkennwerte für den Werkstoff Edelstahl nach ON EN 1993-1-4: 1996 . . . . .	2
2	Lastfallkombinationen Rinne ULS . . . . .	37
3	Lastfallkombinationen Rinne SLS . . . . .	37
4	Steifheitszahlen für das Spannungsausgleichsverfahren . . . . .	71
5	Lastfallkombinationen Freibad zur Stauhautberechnung . . . . .	72
6	Lastfallkombinationen Hallenbad zur Stauhautberechnung . . . . .	72
7	Ermittlung des Vergleichsspannungsgrenzwertes für die untersten Horizontalrippen	77
8	Nachweisverfahren . . . . .	91

## Literaturverzeichnis

- [Berndorf Bäderbau 2010] BERNDORF BÄDERBAU: *Materialien & Werkstoffe*. 2010.  
– URL [http://www.berndorf-baederbau.com/SITES/Deutsch/werkstoff/edelstahl\\_im\\_schwimmbadbau.php](http://www.berndorf-baederbau.com/SITES/Deutsch/werkstoff/edelstahl_im_schwimmbadbau.php)
- [EN 1990: 1996] EN 1990: *Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung*. Mai 1996
- [EN 1991-4: 1996] EN 1991-4: *Eurocode 1 – Einwirkung auf Tragwerke – Teil 4: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter von nichtrostenden Stählen*. Mai 1996
- [EN 1993-1-1: 1996] EN 1993-1-1: *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Februar 1996
- [EN 1993-1-4: 1996] EN 1993-1-4: *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*. Oktober 1996
- [EN 1993-1-5: 1996] EN 1993-1-5: *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmig Bauteile*. Oktober 1996
- [Günther Born 2006] GÜNTHER BORN, Benjamin B.: *Visual Basic 2005 Programmierhandbuch*. entwickler.press, 2006
- [Informationsstelle Edelstahl Rostfrei 2006] INFORMATIONSTELLE EDELSTAHL ROSTFREI: *Edelstahl Rostfrei - Eigenschaften*. 4. Auflage (2006), S. 17
- [Kolberg 2007] KOLBERG, Michael: *VBA mit Excel*. Franzis Verlag, 2007
- [Richard Greiner 2005] RICHARD GREINER, Siegfried Piringer Christian Salzer Harald U.: *Österreichischer Stahlbauverband – Eurocode 3 – Einführungsseminar*. März 2005
- [Schmaußer 1971] SCHMAUSSER, G. Wickert G.: *Stahlwasserbau*. Springer Verlag, 1971
- [Schneider 2008] SCHNEIDER, Klaus-Jürgen: *Bautabellen für Ingenieure*. Werner Verlag, 2008
- [Sparowitz 2004] SPAROWITZ, Lutz: *Vorlesungsskriptum aus Betonbau*. Tu Graz, 2004
- [Unterweger 2007] UNTERWEGER, Harald: *Brückenbau - Grundlagen / TU Graz*. August 2007 (Version 2). – Forschungsbericht
- [Warren C. Young 1997] WARREN C. YOUNG, Richard G. B.: *Roark's Formulas For Stress and Strain*. Bd. Seventh Edition. McGraw-Hill, 1997

## A Programmcode

In dieser Version der Masterarbeit ist der Programmcode nicht angeführt.

## B Musterlösungen

In dieser Version der Masterarbeit sind die Musterlösungen nicht angeführt.



Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte  
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl